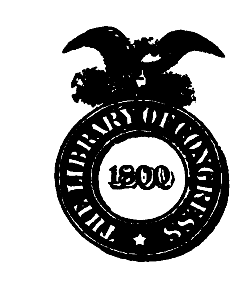



THE LIBRARY OF CONGRESS
1800

A Monsieur
hommage de l'auteur
R. Soreau

SOCIÉTÉ DES INGÉNIEURS CIVILS
DE FRANCE
FONDÉE LE 4 MARS 1848
Reconnue d'utilité publique par décret du 22 décembre 1860
10, Cité Rougemont, 10.
PARIS

LE PROBLÈME

DE LA

DIRECTION DES BALLONS

PAR

Rodolphe SOREAU
INGÉNIEUR
ANCIEN ÉLÈVE DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE

EXTRAIT DES MÉMOIRES DE LA SOCIÉTÉ DES INGÉNIEURS CIVILS DE FRANCE
(Février 1893)

31 FIGURES DANS LE TEXTE

PARIS
10, cité Rougemont, 10
1893

SOCIÉTÉ DES INGÉNIEURS CIVILS
DE FRANCE
FONDÉE LE 4 MARS 1848
Reconnue d'utilité publique par décret du 22 décembre 1860
10, Cité Rougemont, 10,
PARIS

LE PROBLÈME
DE LA
DIRECTION DES BALLONS

PAR

Rodolphe SOREAU
INGÉNIEUR
ANCIEN ÉLÈVE DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE

EXTRAIT DES MÉMOIRES DE LA SOCIÉTÉ DES INGÉNIEURS CIVILS DE FRANCE
(Février 1893)

37 FIGURES DANS LE TEXTE

PARIS
10, cité Rougemont, 10
—
1893

LE PROBLÈME

DE

LA DIRECTION DES BALLONS

PAR

M. Rodolphe SOREAU

Messieurs,

Après plusieurs années de laborieuses recherches, le commandant Renard, directeur de notre Établissement central d'aérostation militaire, est, nous assure-t-on, à la veille d'expérimenter un ballon dirigeable (1) capable d'évoluer dans les airs pendant une dizaine d'heures, avec une vitesse propre d'environ **11** *m* par seconde, soit 40 *km* à l'heure ; la direction des ballons serait donc pratiquement résolue. J'ai pensé, et notre Président a bien voulu m'y encourager, qu'à cette occasion il était peut-être opportun d'exposer devant la Société des Ingénieurs Civils ce problème de la direction, longtemps condamné par la science officielle, et contre lequel il y a tant de préjugés. Au reste, cette question intéresse au plus haut point l'art de l'Ingénieur, et vous avez déjà manifesté à diverses reprises qu'elle ne vous laisse pas indifférents.

(1) La construction de ce dirigeable a été officiellement annoncée à l'Académie des Sciences il y a quelques années.

PREMIÈRE PARTIE

Conditions du problème et tentatives de direction.

Sans la direction, la prétendue conquête de l'air n'est qu'un mot, car l'aérostat, emporté par les courants aériens au gré de leurs caprices, est bien plutôt le prisonnier que le vainqueur des éléments. Aussi l'homme chercha-t-il à diriger le ballon l'année même où il le découvrit ; mais, jusqu'à ces derniers temps, toutes les tentatives ont échoué. Faut-il en conclure, suivant la formule qu'on enseignait encore il y a quelques années, « qu'il n'y a pas de point d'appui sur l'air ? » Pour expliquer les insuccès de ces tentatives, il n'y a pas besoin de recourir à cet étrange aphorisme ; il suffit de rechercher les conditions nécessaires imposées par la nature même de la question et par l'état actuel de la science. Je crois utile de dégager dès maintenant ces conditions, dont la connaissance permettra de bien saisir la valeur des essais qui ont été faits et de voir dans quelle voie il convient de rechercher le progrès.

1. — Conditions du problème.

Théorème des vitesses et caractéristique du ballon dirigeable. — Au

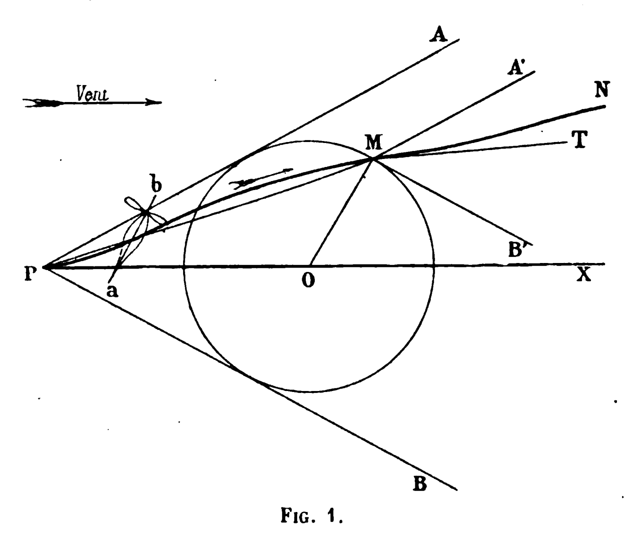


Fig. 1.

point de vue mécanique, le ballon dirigeable diffère de l'aérostat ordinaire par la vitesse propre dont il est animé. Précisons en quoi

consiste au juste cette différence et pour cela supposons les deux ballons côte à côte en un point P *(fig. 1 et 2)*. Tandis que l'aérostat, sorte de bouée entraînée par le vent, parcourt PX et se trouve, au bout de l'unité de temps par exemple, en un point O, le dirigeable parcourt le chemin PM tel que la droite OM soit égale à la vitesse propre du dirigeable et parallèle à la direction *a b* du cap. Quand cette direction change, le point M décrit une circonférence de centre O qui constitue le lieu des points que le dirigeable, parti de P, peut atteindre dans l'unité de temps.

Lorsque la vitesse propre v est inférieure à la vitesse V du vent *(fig. 1)*, la direction PM est forcément comprise dans l'angle APB dont la moitié a pour sinus $\frac{v}{V}$. Dans ce cas, si le ballon change de direction en partant de M, la direction nouvelle est encore comprise dans l'angle A'MB' dont les côtés sont parallèles à ceux de l'angle précédent. Par suite le dirigeable ne peut suivre qu'une courbe PMN telle, que la tangente MT en un point quelconque fasse avec la direction du vent un angle dont le sinus soit inférieur à $\frac{v}{V}$.

Au contraire, si la vitesse v est supérieure à V *(fig. 2)*, la route

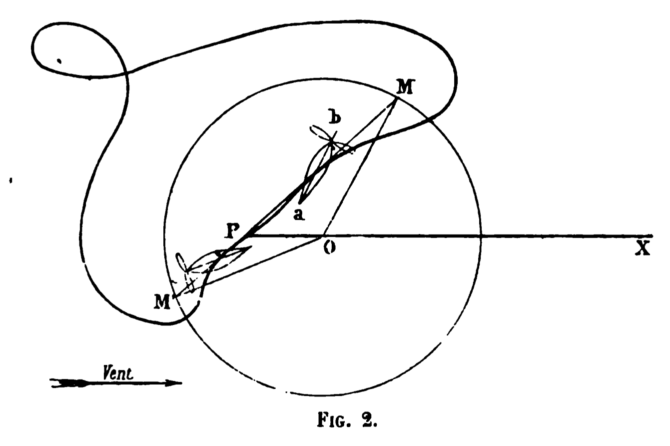


Fig. 2.

peut être quelconque puisque la circonférence des points abordables entoure le point de départ et qu'on peut décrire une droite PM dans un sens ou dans l'autre. Il est possible en particulier de décrire une courbe qui se ferme sur elle-même; inversement, *si le ballon est capable de suivre une courbe fermée*, v est supérieur à V, et par suite *on peut suivre telle route qu'on voudra*. Cette propriété est donc une caractéristique de la dirigeabilité.

De ce qui précède résulte que la direction des ballons est avant tout une question de vitesses. Pour savoir quelle chance on a de conduire en tous sens un aérostat ayant une vitesse donnée, il suffit évidemment de consulter une table de probabilité des vents. Voici un extrait de cette table pour notre région :

VITESSE	PROBABILITÉ D'AVOIR UN VENT INFÉRIEUR A LA VITESSE INSCRITE
—	—
2,50	0,10
5	0,32
10	0,70
20	0,96
30	0,995

Le nouveau dirigeable de Chalaís-Meudon pourra donc revenir environ trois fois sur quatre à son point de départ, les ascensions étant faites par des temps absolument *quelconques*. Remarquons en outre que la vitesse et la direction des courants aériens changent avec la hauteur, circonstance qu'on peut utiliser pour augmenter la vitesse de marche et même pour aborder, quand la vitesse est inférieure à celle du vent, des points dont l'accès serait interdit avec un courant unique. Dans ces conditions, on voit que la vitesse de 11 *m* est très généralement suffisante. Avec une vitesse de 20 *m* on pourrait se diriger à son gré, sauf par les vents assez violents pour endommager les toitures. J'ajoute que l'aéronaute, emporté par les courants aériens avec leur propre vitesse, ne s'aperçoit de l'ouragan que par la rapidité avec laquelle la terre est entraînée sous ses pieds.

Tel est le problème, débarrassé des conceptions vagues dont on l'avait entouré. Mais si l'on voit clairement le but qu'il faut atteindre, à savoir une vitesse propre d'au moins 10 *m* pendant un temps suffisant, une demi-journée par exemple, on est moins bien fixé sur les moyens qui doivent sûrement y conduire. Pour découvrir ces moyens, examinons les conditions spéciales dues à la nature du milieu et aux propriétés du mobile qu'on veut y déplacer.

Le milieu est un fluide isolé, et c'est là précisément ce qui distingue la navigation aérienne de la navigation maritime, à laquelle on ne saurait l'assimiler. Le navire, en effet, plonge dans deux fluides, et il se sert de l'un ou de l'autre pour vaincre les resistances que leur ensemble oppose à son déplacement : le voilier a recours à la vitesse du vent, le bateau à vapeur utilise la réaction de l'eau sur un propulseur; au contraire le ballon diri-

geable, plongé dans un seul fluide, doit vaincre la résistance de l'air par la seule réaction de cet air lui-même sur le propulseur. De plus, tandis que le bateau se meut dans un plan horizontal, le ballon est soumis à une perpétuelle instabilité verticale qui complique singulièrement les difficultés de la propulsion. Il y a même de grandes différences entre le cas du dirigeable et celui du bateau sous-marin. L'instabilité verticale est plus gênante pour ce dernier; en effet la moindre variation de poids le fait sortir de sa zone d'équilibre et l'entraîne soit au fond, soit à la surface : on sait du reste que cette difficulté de se maintenir « entre deux eaux » est la pierre d'achoppement de la navigation sous-marine. Au contraire, l'aéronaute ne peut quitter le fluide où il se meut que par un alourdissement du ballon, et dans ce cas le lest lui donne un moyen rapide et simple d'enrayer la descente. Par contre, l'incompressibilité de l'eau est favorable à la mise en œuvre du propulseur qui trouve un point d'appui efficace, tandis que l'hélice aérienne mord dans un milieu d'une désespérante mobilité.

Légèreté du moteur. — Il faudra donc développer un grand nombre de chevaux sur l'arbre de cette hélice. Mais comme le ballon demande au moins 1 m^3 par kilogramme à enlever, on s'aperçoit, dès qu'on établit un projet de ballon dirigeable, qu'il est nécessaire d'obtenir la force à un poids beaucoup moindre que dans les moteurs de construction courante. Ainsi la condition qui domine le problème est la découverte d'un moteur à la fois puissant et léger; et si l'on considère (ce que j'établirai plus loin) que le travail à développer varie comme le cube des vitesses, on conçoit la nécessité absolue, dans l'état actuel de la question, non seulement d'imaginer un moteur léger, mais encore de réduire à leur minimum les résistances à l'avancement.

Diminution des résistances à l'avancement. — Pour diminuer ces résistances, il faut évidemment allonger le ballon dans le sens de la marche. Mais les effets de cet allongement ne se feront sentir que si l'étoffe est toujours parfaitement tendue : autrement des poches se formeront à l'avant, au point où la résistance sera maximum, et l'air, au lieu de glisser sur l'étoffe, s'arc-boutera en quelque sorte contre le ballon, augmentant la résistance du simple au décuple, compromettant la stabilité, et pouvant même étrangler l'enveloppe dans les mailles du filet.

Mais ce n'est pas la seule condition qu'il soit nécessaire de remplir. Supposons un ballon dirigeable dont l'axe coïncide

avec la direction du mouvement quand il marche à une vitesse déterminée. Le moteur étant dans la nacelle, il est clair que si le système ballon-filet-nacelle ne forme pas un tout rigide, les suspentes ne travaillent pas également ; ce travail varie quand les vitesses changent, et baisse ou relève la pointe avant suivant qu'il y a ralentissement ou accélération (à moins que l'axe de propulsion ne passe par le centre d'inertie). Si le système est rigide, cette baissée ou cette relevée se produit encore, mais il y a dans ce cas un avantage capital. Supposons, en effet, que la proue se relève : le dessous du ballon offre au courant plus de surface à l'avant et moins de surface à l'arrière ; d'autre part le gaz se précipite vers la proue ; pour ces deux raisons, la déformation du système due à la variation de vitesse tend à s'accentuer. Mais lorsque la liaison est rigide et la permanence de formes assurée, le système constitue une sorte de bloc ; et comme le centre de gravité est toujours au-dessous du point d'application de la force ascensionnelle, il suffit de quelques oscillations pour éteindre la rotation.

Le mouvement de tangage peut encore être produit par une cause dont on ne s'est pas suffisamment préoccupé : je veux parler de l'instabilité verticale. S'il se produit une rupture d'équilibre qui donne par exemple une vitesse ascendante *v* (*fig. 3*), cette vitesse se compose avec la vitesse V du ballon et la résistance à l'avancement s'exerce suivant la direction α, ce qui augmente beaucoup la résistance et peut amener de graves complications avec des ballons très allongés. Or les fuites inévitables de gaz, les perpétuels changements dans l'état de l'atmosphère, les variations du rayonnement solaire, etc., modifient à chaque instant l'équilibre vertical. Au lieu des moyens rudimentaires habituels, manœuvre de soupape et projection de lest, qui, du reste, ne corrigent le déplacement qu'après qu'il s'est produit, il faudrait une disposition automatique qui est encore à trouver. Toutefois, il est juste de remarquer qu'en augmentant la vitesse propre on assurera de plus en plus la stabilité dans le plan horizontal, de sorte que la disposition automatique désirée n'est réellement très utile qu'aux faibles vitesses qui marque-

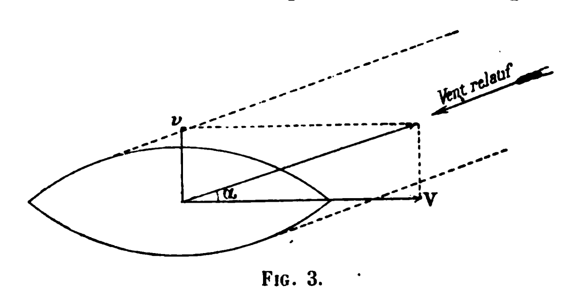


Fig. 3.

ront pendant quelques années encore les débuts de la navigation aérienne.

Il est clair que, de leur côté, la nacelle et le filet doivent concourir par leur forme et leur disposition à diminuer les résistances à l'avancement. S'il n'y a pas à imposer de prescription capitale à leur égard, il n'en est pas moins très utile d'étudier leur forme avec le plus grand soin ; je montrerai plus loin quelle part insoupçonnée ils ont dans la répartition des résistances.

En résumé, pour qu'on ait quelques chances de vaincre la résistance à l'avancement, il faut, indépendamment d'un moteur léger : 1° un ballon allongé ; 2° l'invariabilité de formes : 3° la rigidité du système ; 4° l'équilibre vertical ; 5° une nacelle et un filet de formes et de dimensions convenables.

Stabilité de route. — Toutes ces précautions resteraient sans effet si l'on ne prenait soin d'assurer la stabilité de route. Il faut donc aux conditions précédentes en ajouter de nouvelles plus importantes encore. On essaie d'obtenir la stabilité de route à l'aide d'un gouvernail qui de plus donne, ainsi que dans les bateaux, un moyen simple de modifier la direction suivie. Il est clair que le gouvernail, quelles que soient ses dimensions et sa distance à la verticale qui passe par le centre d'inertie du système, serait impuissant si la résistance variait à chaque instant : tel serait le cas avec un dirigeable incomplètement gonflé. Ainsi la permanence de forme doit être considérée comme un moyen non seulement de diminuer la résistance à l'avancement, mais *surtout* d'assurer la stabilité.

Le ballon fût-il maintenu constamment gonflé qu'il n'échapperait certainement pas aux fréquents mouvements giratoires des aérostats ordinaires, s'il affectait la forme sphérique de ces derniers : en effet la plus petite variation qui détruirait la symétrie de cette forme suffirait à provoquer la rotation autour de l'axe. L'allongement du dirigeable, en même temps qu'il réduit la résistance, permet donc de gouverner en route en diminuant la fréquence des mouvements giratoires et aussi en augmentant l'efficacité du gouvernail qu'il éloigne du centre d'inertie.

Ainsi la stabilité de route est obtenue par des conditions déjà trouvées. Toutefois ces conditions ne sont pas toujours suffisantes, en particulier quand la vitesse relative change fréquemment d'intensité ; il se produit alors des embardées, des tête-à-queue contre lesquels le gouvernail reste impuissant. Je serai amené

à montrer comment on peut demander au ballon de contribuer par sa forme même à assurer la stabilité de sa route.

Si j'ajoute que plus le ballon est grand, plus on a de chances de parvenir à le diriger, — puisque d'une part, pour deux ballons géométriquement semblables, la force ascensionnelle par unité de volume est plus considérable pour le grand ballon, et que d'autre part le poids du cheval diminue avec la force à donner aux machines, — j'aurai exposé les principales conditions qui doivent présider à la construction des ballons dirigeables. Je les ai groupées dans le tableau suivant :

Légèreté du moteur	
Diminution des résistances à l'avancement.	Ballon allongé ; Invariabilité de formes ; Rigidité du système ; Équilibre vertical ; Nacelle et filet de formes et de dimensions convenables.
Stabilité de route . .	Allongement du ballon et rigidité du système ; Gouvernail ; Forme du ballon.

2. — Tentatives de direction.

Examinons maintenant les tentatives qui méritent de fixer l'attention. Dans cet examen forcément rapide je serai très sobre de détails et je chercherai surtout à mettre en lumière si et comment les conditions précédentes ont été réalisées. Autant que possible je les examinerai dans l'ordre où elles figurent au tableau.

Général Meusnier. — Le véritable précurseur de la direction des ballons est le général Meusnier, ce savant dont Monge a pu dire : « C'est l'intelligence la plus extraordinaire que j'aie jamais rencontrée. » Dans une série de Mémoires écrits à partir de 1783, Meusnier établit un projet de dirigeable qui du reste ne put recevoir, à ces époques troublées, le moindre commencement d'exécution ; il eût d'ailleurs été difficile de mener à bien ce ballon gigantesque, sorte d'œuf de 200 000 m^3.

Trois particularités caractérisent ce projet : 1° le propulseur, formé d'ailes tournantes qui constituaient une véritable hélice ; de sorte que, suivant la remarque du colonel Laussedat, Meusnier aurait pensé, bien avant Sauvage, à employer l'hélice pour la navigation (1) ; 2° la forme ellipsoïdale du ballon ; 3° la pré-

(1) J'ajoute que l'idée d'employer pour la navigation des appareils qui rappellent l'hélice est antérieure à Meusnier ; M. Hureau de Villeneuve l'a trouvée dans les manuscrits de Léonard de Vinci.

sence, à l'intérieur de l'enveloppe, d'une poche dans laquelle on pouvait aspirer ou comprimer l'air atmosphérique. Cette sorte de vessie natatoire avait pour but de réaliser les mouvements de montée et de descente, sans perte ni de lest ni de gaz ; Meusnier comptait ainsi trouver un courant aérien conduisant à peu près dans la direction voulue, puis passer à un autre courant afin de corriger l'écart dû au premier, et ainsi de suite, de façon à suivre par une série de zig-zags à peu près telle route qu'il voudrait. Il n'attaquait donc pas le problème de front, et dans son esprit le propulseur, mû à bras d'hommes, ne devait jouer un rôle qu'à l'atterrissage.

Henri Giffard. — La première expérience rationnelle n'eut lieu qu'un demi-siècle après la mort de Meusnier. Elle fut exécutée par un homme dont il est superflu de faire ici l'éloge, et dont l'esprit, à la fois inventif et hardi, devait être attiré par la grandeur du problème.

Le ballon qu'Henri Giffard construisit en 1852 (*fig. 4*) avec

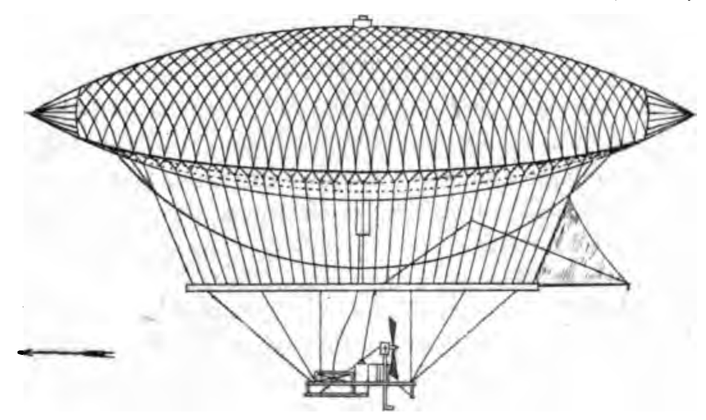


Fig. 4.

l'aide de MM. David et Sciama, ingénieurs des Arts et Manufactures, réalisait les conditions suivantes :

1° Comprenant l'impuissance d'un propulseur mû à bras d'hommes, Giffard résolut d'employer la machine à vapeur, alors dans toute sa gloire. L'installation d'un pareil moteur au-dessous d'un réservoir contenant 2 500 m^3 de gaz d'éclairage constituait un danger qui ne le retint pas. Il se contenta de placer le foyer à l'intérieur d'une chaudière à double enveloppe, et de faire évacuer les gaz par une cheminée descendante où la vapeur s'élançait avec force à sa sortie du cylindre ; grâce à ce tirage

énergique, les gaz de la combustion, déjà refroidis par leur passage dans l'enveloppe, étaient appelés dans la cheminée, où la détente de la vapeur abaissait encore leur température, les purgeait d'étincelles, et les projetait rapidement à l'arrière de façon à aider au mouvement de propulsion. La machine était à cylindre vertical ; elle réalisait déjà une partie des progrès qu'en dix années, de 1851 à 1861, cet inventeur de génie fit accomplir à la machine à vapeur (1) ; sa force était de 3 *chx* et son poids de 150 *kg* avec la chaudière vide ; ses approvisionnements avaient un poids double. La bielle du moteur actionnait à raison de 110 tours par minute une hélice à trois branches de 3,40 *m* de diamètre ;

2° Le ballon était un fuseau à pointes aiguës qui présentait assurément une forme plus logique que l'ellipsoïde. Il mesurait 44 *m* de pointe à pointe ; l'allongement, c'est-à-dire le rapport de la longueur à la hauteur maximum était de 3,6 ;

3° Le filet embrassait toute la partie supérieure presque jusqu'aux pointes ; un peu au-dessous de l'équateur, les mailles s'épanouissaient en pattes d'oie afin de mieux répartir les pressions sur l'enveloppe ; de ces pattes partaient des suspentes supportant une longue quille horizontale de 20 *m* à laquelle la nacelle était suspendue ; la suspente arrière servait de hampe au gouvernail. La soupape placée au sommet du ballon pouvait être ouverte par une corde qui traversait la manche d'appendice, située sur la même verticale.

« Je suis parti seul de l'Hippodrome, écrit Giffard. Le vent soufflait avec une assez grande violence. Je n'ai pas songé un seul instant à lutter directement contre le vent ; la force de la machine ne me l'eût pas permis, cela était prévu d'avance et démontré par le calcul ; mais j'ai opéré avec le plus grand succès diverses manœuvres de mouvement circulaire et de déviation latérale. L'action du gouvernail se faisait parfaitement sentir, et à peine avais-je tiré légèrement une de ses deux cordes de manœuvre que je voyais immédiatement l'horizon tournoyer autour de moi... Cependant la nuit approchait... Je m'occupai de

(1) Frappé du poids et des dimensions des moteurs qu'on construisait alors, Giffard s'appliqua à les réduire : à cet effet il diminua le volume du cylindre, augmenta la pression de la vapeur et l'énergie de la combustion par le tirage forcé, décupla la vitesse du piston, allégea le volant, et obtint ainsi une machine à grande vitesse, légère, peu encombrante, qui produisit une véritable révolution dans l'industrie. Elle valut à son auteur une médaille de 1re classe à l'Exposition de 1851, et en 1859 le prix de Mécanique de la fondation Montyon, qui avait déjà récompensé les travaux de Poncelet, de Girard, de Triger, etc...

regagner la terre, ce que j'effectuai très heureusement dans la commune d'Elancourt, près Trappe. »

Après cette belle expérience, Giffard chercha à faire un nouveau pas en avant. Il construisit un aérostat de 3 200 m^3 ayant une longueur de 70 *m*, ce qui correspond à un allongement de 7, sensiblement double du précédent (*fig. 5*) (1) ; la quille fut rem-

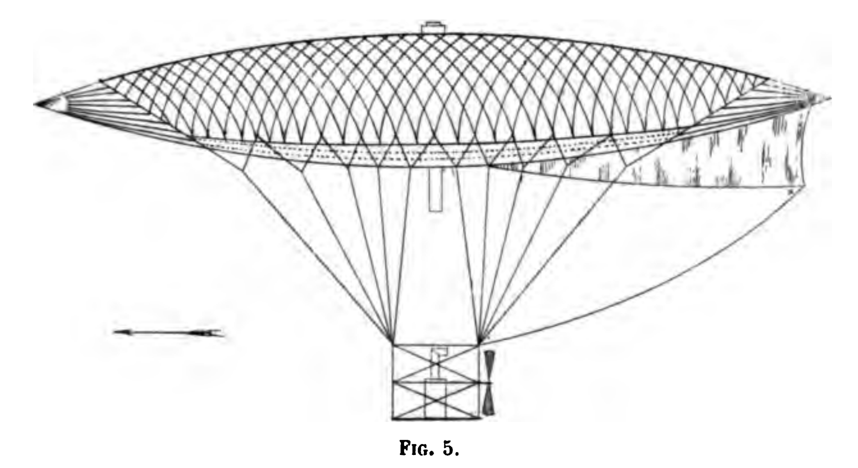


Fig. 5.

placée par une traverse en bois placée suivant le méridien supérieur dont elle épousait la forme, ce qui ne me semble pas constituer un perfectionnement sur la disposition primitive ; enfin, le moteur et le gouvernail subirent d'heureuses modifications. Toutefois, Giffard ne vit pas que l'allongement considérable qu'il avait adopté exigeait des précautions toutes spéciales. Aussi l'expérience de 1855, faite en compagnie de M. Gabriel Yon par un vent de 4 *m*, donna-t-elle de moins bons résultats que la première ; elle faillit même se terminer par une catastrophe : à l'atterrissage, le ballon se redressa, s'échappa du filet et, après une nouvelle ascension, retomba coupé en deux morceaux. Ce que le choc avait produit à terre, une variation brusque dans la vitesse du vent pouvait le déterminer à plusieurs centaines de mètres !

D'après ce que j'ai dit sur les conditions qu'un ballon dirigeable doit remplir, on voit que les deux grands défauts des ballons Giffard étaient de ne réaliser ni la permanence de formes ni la rigidité du système ; de plus, étant donnée la faible puissance du moteur, il eût été nécessaire de chercher à obtenir la stabilité

(1) Afin qu'on puisse mieux comparer les différents ballons dirigeables, les dessins les représentent tous à une même échelle ; toutefois, les nécessités de la mise en page ont conduit à réduire du quart le dessin du second ballon Giffard.

verticale, surtout avec le second ballon. Un seul de ces défauts aurait empêché le succès. Comme défauts accessoires je citerai les suivants : le capitonnage du filet diminuait singulièrement les avantages de l'allongement au point de vue de la résistance ; la dépense d'eau et de combustible produisait un délestage continu que ne compensaient pas les pertes inévitables de gaz ; enfin l'emploi du gaz d'éclairage n'était pas heureux, et les difficultés du problème sont assez grandes pour qu'on n'hésite pas à gonfler à l'hydrogène.

Quoi qu'il en soit, Giffard, qui rêvait de conduire la première locomotive aérienne, aura du moins eu la gloire de construire et de monter le premier aérostat qui puisse se revendiquer des ballons dirigeables. Il avait conçu le projet grandiose d'un ballon gigantesque de 50 000 m^3 ; le moteur devait avoir deux chaudières, l'une à gaz du ballon, l'autre à pétrole. J'aurai l'occasion, dans l'étude des moteurs légers, de dire quelques mots de ce système. Le million destiné à cette expérience était mis de côté, les plans étaient prêts, quand Giffard, frappé de cécité, dut renoncer à ses travaux. Avant de se donner la mort, l'éminent Ingénieur voulut encore servir la science en la faisant profiter de la grande fortune que lui avait donnée toute une vie de labeur.

Dupuy de Lôme. — Les travaux de Giffard ne changèrent pas l'opinion du public qui continua, sauf quelques rares exceptions, à considérer la direction des ballons comme une utopie. Telle était l'opinion officielle quand, le 10 octobre 1870, en pleine Académie des Sciences, un homme considérable, Dupuy de Lôme, affirma avec une conviction communicative qu'il se chargeait de construire un ballon dirigeable et de rétablir, par-dessus le cercle

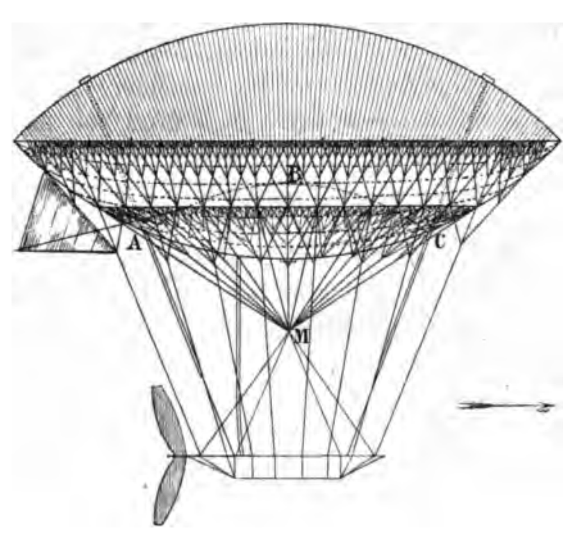


Fig. 6.

de fer qui étreignait Paris, la réciprocité des relations entre la France et sa capitale. Fallait-il douter de l'Ingénieur qui avait construit le premier cuirassé et qui passait à bon droit pour une des illustrations du siècle? Un crédit de 40 000 *f* fut mis à sa disposition; mais la désorganisation de l'industrie, les rigueurs de l'hiver, le manque de ressources, rendirent la construction très lente, et le dirigeable fut prêt quelques jours seulement avant la capitulation. Il se caractérisait par les dispositions suivantes *(fig. 6)*:

1° Le propulseur était une hélice à deux branches, mue par un treuil actionné par huit hommes; elle avait 6 *m* de diamètre;

2° Le ballon, qui mesurait 3 600 m^3, avait une forme analogue à ceux de Giffard, mais un allongement de 2,5 seulement; sa longueur était de 36 *m;*

3° La rigidité du système avait été obtenue très simplement en reliant un point P de la nacelle *(fig. 7)* à deux points A et B du

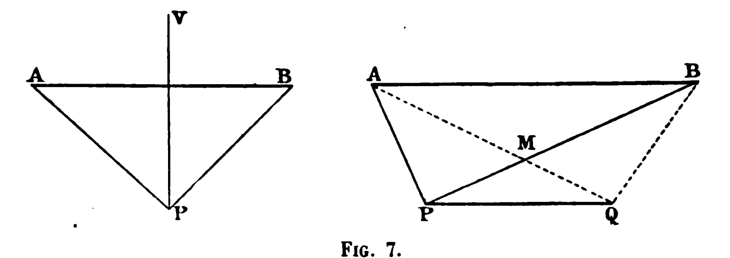


Fig. 7.

ballon, de façon que la verticale PV fût toujours comprise à l'intérieur de l'angle APB quand le système venait à s'incliner pour une cause quelconque. Dans ces conditions, le poids de la nacelle tend les deux cordages, et le système possède la même rigidité que s'il était formé de barres métalliques solidement rivées à leurs articulations. Les suspentes extérieures AP, BQ constituaient le filet porteur; elles partaient d'une collerette qui suivait le méridien horizontal. Les suspentes intérieures AQ, BP formaient le filet des balancines; elles s'attachaient à une seconde collerette, située au quart environ de la hauteur totale, de façon à être tangentes au ballon. Le point de croisement M avait été relevé pour ne pas gêner les aéronautes. Le grand Ingénieur a magistralement exposé les avantages de ces deux filets, dont la combinaison porte bien l'empreinte de son talent;

4° Dupuy de Lôme, réinventant le ballonnet à air de Meusnier, dont les Mémoires étaient oubliés dans les archives de l'école de Metz, divisa le ballon en deux compartiments à l'aide d'un dia-

phragme ABC qui s'appliquait exactement sur la partie inférieure du dirigeable quand celui-ci était complètement gonflé. Pour assurer l'invariabilité de formes, il suffisait d'insuffler de l'air avec un ventilateur dans le tuyau qui relie le ballonnet à la nacelle. Si l'air insufflé était en trop grande quantité, il s'échappait par la soupape située à la partie inférieure du ballonnet avant d'avoir acquis une pression suffisante pour chasser l'hydrogène par les pendentifs qu'on voit à droite et à gauche du ballon; c'est dans ces pendentifs que passaient les cordes servant à manœuvrer les deux soupapes du ballon à hydrogène. Un calcul simple détermine les dimensions qu'il faut donner au ballonnet pour que le dirigeable, après s'être élevé à une hauteur déterminée, puisse être maintenu complètement gonflé jusqu'à l'atterrissage (1);

5° Enfin, la résistance à l'avancement avait été diminuée par la substitution au filet d'une housse d'où partaient les balancines, et par l'adoption d'une longue nacelle terminée par une proue et une poupe recouvertes de toile.

Ce ballon, très bien étudié au point de vue de la stabilité, présente le défaut capital d'avoir une force motrice absolument insuffisante. Dupuy de Lôme le comprit. « Si l'on parvenait, écrivait-il, à se mettre bien à l'abri des dangers que présente une machine à feu portée par un ballon à hydrogène, on ferait facilement une machine de 8 *chx* avec le poids des 7 hommes dont on pourrait diminuer le chiffre de l'équipage... Le travail moteur serait ainsi de 500 *kgm*, c'est-à-dire dix fois plus grand... Le combustible et

(1) Soit p la pression de l'air à cette hauteur. Le diaphragme est alors appliqué sur la calotte inférieure et l'hydrogène occupe le volume total V de l'aérostat. A la descente, le gaz se contracte et occupe un volume $\frac{V}{n}$ à la pression np. Pour que l'enveloppe ne puisse pas devenir flasque, il faut évidemment que ce volume reste toujours supérieur au volume $V - v$ auquel se trouve réduite la chambre à hydrogène quand le ballon à air v est complètement gonflé. Par suite,

$$\frac{V}{n} > V - v$$

la valeur maximum de n a donc pour inverse :

$$\frac{1}{N} = 1 - \frac{v}{V}.$$

Or, cette valeur maximum correspond à la pression P à terre; par conséquent, il ne faut pas dépasser l'altitude pour laquelle la pression est :

$$p = \left(1 - \frac{v}{V}\right)P.$$

En prenant $\frac{v}{V} = \frac{1}{10}$, comme dans l'aérostat de Dupuy de Lôme, on en déduit par les tables barométriques que la hauteur maximum est de 860 *m* environ. Si on dépassait cette altitude, il faudrait cracher trop d'hydrogène à la montée, et il y aurait alors à la descente, depuis une certaine hauteur jusqu'au sol, toute une région dans laquelle le ballon serait flasque.

l'eau d'alimentation pourraient être prélevés sur le lest de consommation. On obtiendrait ainsi un appareil capable non seulement de se dévier d'un angle considérable par des vents ordinaires, mais pouvant même assez souvent faire route par rapport à la terre dans toutes les directions qu'il faudra suivre. »

On peut aussi reprocher à Dupuy de Lôme le faible allongement de son ballon; tandis que Giffard n'avait pas craint de donner au ballon de 1855 un allongement de 7, et cela sans précautions spéciales, Dupuy de Lôme, avec un ballon remarquablement rigide, se contenta de 2,5; un allongement double, complété par un moteur de 8 *chx*, aurait certainement donné de très beaux résultats. J'ajoute que le ballonnet n'était pas fait, comme on l'a dit, pour qu'on y comprimât de l'air afin d'éviter l'emploi des soupapes du ballon à hydrogène; ses parois n'avaient pas été établies en vue de supporter de grandes pressions, et la soupape inférieure était règlée de façon à évacuer l'air dès que sa pression dépassait un peu celle de l'atmosphère.

L'expérience eut lieu à Vincennes au commencement de 1872; l'inventeur était accompagné de M. Zédé, Ingénieur des constructions navales, et de M. Yon. Malgré un vent de 12 *m* et quelques accidents de route, on put obtenir une déviation de 12°; l'anémomètre, immobile tant que l'hélice était stoppée, tournait dès qu'on la mettait en mouvement. La stabilité fut parfaite; suivant le rapport de Dupuy de Lôme, « la nacelle n'éprouvait *aucune oscillation* sous l'action de huit hommes travaillant au treuil de l'hélice, et l'on pouvait se porter facilement plusieurs personnes à la fois à gauche et à droite, ou de l'avant à l'arrière, sans qu'on s'aperçût d'aucun mouvement, pas plus que sur le parquet d'un salon. Évidemment, le centre de gravité se déplaçant, il y avait un petit changement de degré dans la verticale de tout le système, ballon et nacelle; mais il était impossible d'apercevoir un mouvement relatif de la nacelle par rapport au ballon, ni rien d'analogue aux oscillations d'une embarcation flottante dont l'équipage se déplace. »

Bien que Dupuy de Lôme n'ait pu remonter le courant, en raison de l'insuffisance du moteur, ses travaux ont eu pour résultat, suivant l'expression même de la Commission de savants instituée pour assister à son expérience, « de faire sortir la question du vague dans lequel elle avait été maintenue jusqu'alors et de servir de point de départ nécessaire à tout ce qu'on voudrait continuer dans ce sens ».

MM. Tissandier. — Il semblait qu'avec Dupuy de Lôme, l'Aéronautique avait dit son dernier mot; mais un élève de Giffard, héritier de la foi et de l'énergie du maître, résolut d'entreprendre de nouveaux essais avec une machine dont on attendait alors toutes sortes de merveilles, le moteur électrique. Il est évident du reste que la dynamo, qui fonctionne sans feu et sans variation de poids, n'est pas sans avantages au point de vue aérostatique.

Les caractéristiques du ballon que M. Gaston Tissandier construisit avec la collaboration de son frère Albert étaient les suivantes (*fig. 8*) :

1° La dynamo était du type Siemens ; on l'actionnait avec une pile au bichromate de soude, très ingénieusement disposée de façon à réduire les poids et à obtenir un grand débit. Le moteur pesait 55 *kg* et les piles 225, y compris le liquide pour les faire fonctionner pendant 2 heures et demie. On pouvait obtenir 1,33 *ch* sur l'arbre de la machine, ce qui met le poids moyen du cheval-heure pendant cette durée à un peu plus de 150 *kg*. L'hélice était à deux branches et n'avait que 2,80 *m* de diamètre ; elle était commandée par une transmission au 1/10e : c'est là un inconvénient inhérent à la nature même du moteur ;

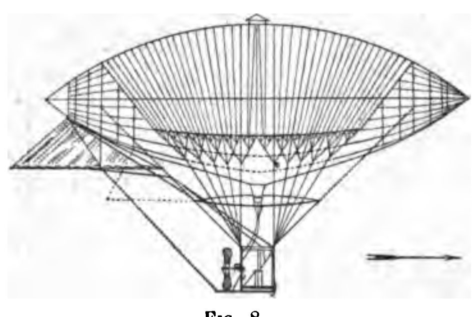


Fig. 8.

2° Le ballon était un fuseau de 1 000 m^3 ayant 28 *m* de longueur et 3 d'allongement ; il était muni d'une soupape automatique à sa partie inférieure ;

3° Il était recouvert d'une housse terminée par deux brancards de bois flexibles d'où partaient les cordes de suspension. Celles-ci étaient reliées par une couronne en cordage ayant pour but de répartir également la traction ; ce dispositif ne donne certainement pas une répartition absolue : je crois cependant qu'il avait une certaine efficacité.

La grande faute de MM. Tissandier est de n'avoir pas profité des travaux de Dupuy de Lôme pour assurer la rigidité de la suspension et l'invariabilité de formes. Enfin, pas plus que leurs prédécesseurs, ils ne se préoccupèrent de maintenir rigoureusement le ballon dans un plan horizontal ; il est vrai qu'avec le moteur élec-

trique ils n'avaient plus, comme Giffard, le délestage dû à la dépense d'eau et de combustible ; mais cette cause d'instabilité n'est malheureusement pas la seule.

A l'ascension de 1883 le ballon, monté par les deux frères, fit d'abord bonne contenance. Parti de terre avec un vent nul, il trouva à l'altitude de 500 *m*, comme cela arrive généralement, un vent de 3 *m* contre lequel il put un moment tenir tête. C'est ainsi qu'il stationna quelques secondes au-dessus du bois de Boulogne, mais il fut ensuite agité de mouvements giratoires d'autant plus violents qu'on cherchait davantage à couper le courant. Les aéronautes en conclurent que le gouvernail n'était pas suffisamment efficace.

A l'ascension de 1884 le moteur donnait 1,5 *ch* et le gouvernail, de dimensions un peu plus grandes, était placé tout à fait à l'arrière, de telle sorte qu'il dépassait la poupe ; la partie triangulaire voisine du ballon constituait une sorte de quille immobile ; on déplaçait la partie arrière à l'aide de deux drisses passant sur des poulies (1). Le vent était d'environ 3 *m* à la seconde et la vitesse propre du ballon de 4 *m*. Après avoir sensiblement suivi la ligne du vent, dont quelques manœuvres de gouvernail l'écartèrent un

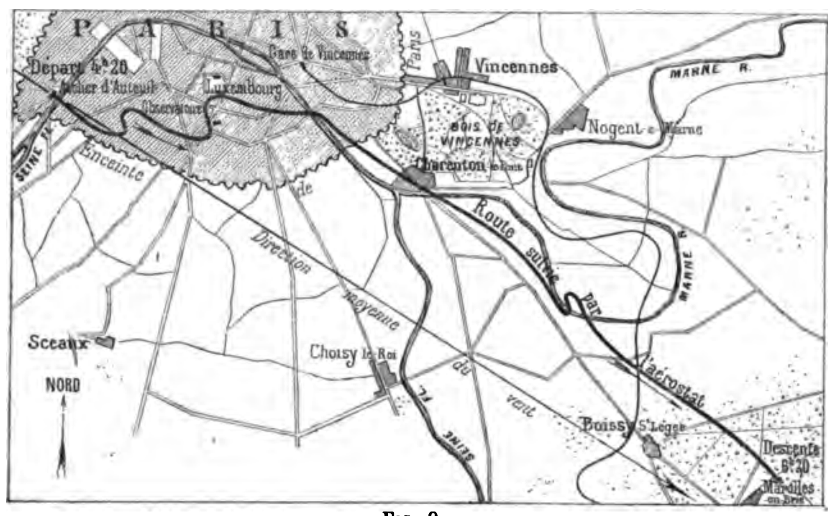


Fig. 9.

peu *(fig. 9)*, le ballon, décrivant une demi-circonférence, se trouva vent debout, et put naviguer ainsi pendant plus de dix minutes

(1) Ce gouvernail est dessiné en traits pleins sur la *fig. 8 ;* des traits pointillés représentent le gouvernail de 1883.

au-dessus du quartier de Grenelle ; il renouvela avec le même succès cette expérience au-dessus de l'Observatoire ; enfin, avant d'atterrir, le vent ayant beaucoup diminué de vitesse, il put remonter le courant avec une plus grande facilité. « Si nous avions eu encore une heure devant nous, a écrit M. G. Tissandier, il ne nous aurait pas été impossible de revenir vers Paris. »

Ainsi, à trois reprises, et pendant quelques minutes chaque fois, MM. Tissandier ont été vainqueurs des éléments ! C'était un beau résultat, si l'on songe aux difficultés rencontrées dans cette entreprise. Le projet primitif comportait un volume de 3 000 m^3 et devait coûter 200 000 *f*. MM. Tissandier firent appel au public, aux Sociétés savantes, et reçurent 4 000 *f* à peine ! C'est là un signe des temps qui montre bien en quelle défaveur était la recherche de la direction des ballons. Livrés à leurs seules ressources, ils durent réduire à 1 000 m^3 le volume de l'aérostat ; M. G. Tissandier obvia en partie aux inconvénients d'un volume aussi réduit en trouvant le moyen de préparer industriellement de l'hydrogène très pur qui possédait la force ascensionnelle remarquable de 1,18 *kg* par mètre cube.

Bien qu'une expérience autrement concluante ait été faite à Chalais avant l'ascension de 1884, la Science n'oubliera pas la grandeur de l'effort fait par MM. Tissandier et leur beau désintéressement. Patriotiques promoteurs de l'aérostation militaire en 1870, ces deux hommes de cœur gagnaient un titre de plus à la reconnaissance de leur pays.

3. — Les expériences de Chalais-Meudon

Ascensions du ballon « la France ». — C'est entre les deux ascensions de MM. Tissandier qu'eut lieu la belle expérience des capitaines Renard et Krebs. Le 9 août 1884, « date désormais mémorable » suivant les paroles d'Hervé-Mangon à l'Institut, le ballon *la France*, ayant à son bord ses deux inventeurs, partait des ateliers militaires de Chalais-Meudon par un temps calme, évoluait avec la plus grande docilité dans le voisinage de l'établissement, puis rentrait à Chalais où il descendait sur la pelouse même du départ, malgré les écueils dont elle est entourée (*fig.* 10) : il avait parcouru 7,600 *km*, en 20 minutes. « Dès que nous eûmes atteint la hauteur des plateaux boisés qui environnent le vallon de Chalais, dit le commandant Renard, nous mîmes l'hélice en mouvement et nous eûmes la satisfaction de voir le ballon obéir immé-

diatement et suivre facilement toutes les indications du gouvernail. Nous sentîmes que nous étions absolument maîtres de notre direction, et que nous pouvions parcourir l'atmosphère dans tous les sens aussi facilement qu'un canot à vapeur peut évoluer sur l'eau calme d'un lac..... Après avoir effectué notre virage, nous dirigeâmes notre cap sur la pelouse de départ et nous la vîmes bientôt se rapprocher de nous. Les murs du parc de Chalais furent de nouveau franchis, et notre port d'atterrissage apparut à nos pieds à 300 *m* au-dessous de notre nacelle. L'hélice fut alors ralentie et un coup de soupape détermina la descente, pendant qu'à l'aide du propulseur et du gouvernail le ballon était maintenu sur la verticale du point où nous attendaient nos aides. Tout se passa suivant nos prévisions, et la nacelle vint se poser doucement sur la pelouse d'où elle était partie. »



FIG. 10.

Cette expérience eut un retentissement considérable et provoqua le plus vif enthousiasme. Ce n'était cependant qu'une ascen-

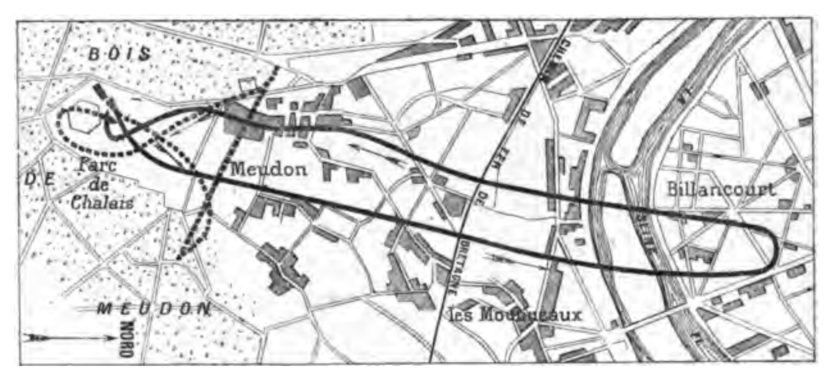


FIG. 11.

sion d'essai, dans laquelle les aéronautes n'avaient pas osé employer toute leur force motrice, et s'étaient hâtés de rentrer au

port, désireux qu'ils étaient de se donner à eux-memes la démonstration pratique qu'ils avaient préparée pour les autres.

Les ascensions ultérieures furent exécutées sur de plus longs parcours et dans des conditions atmosphériques moins favorables.

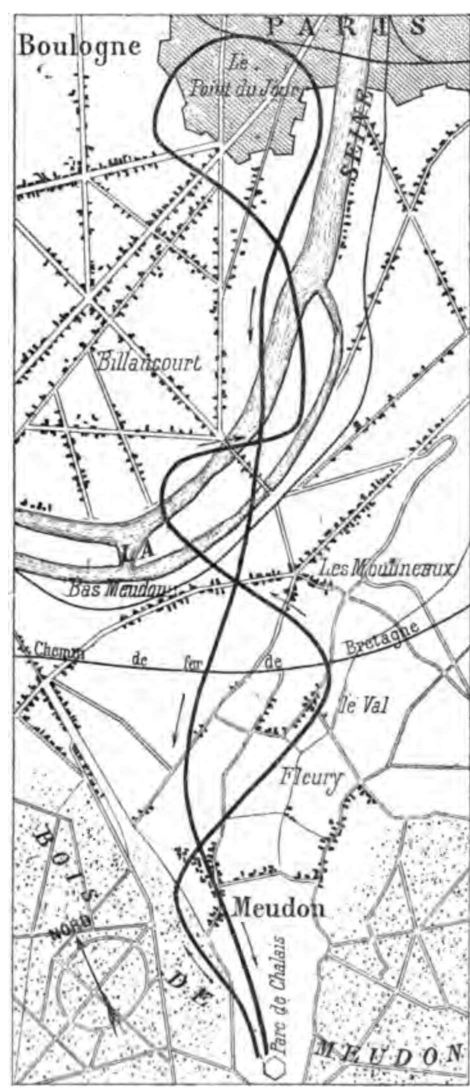


FIG. 12.

La seconde eut lieu le 12 septembre par un vent de 6 *m* contre lequel le ballon lutta sans reculer. Pour remonter le courant, on dut mettre toute la pile en action; mais la machine, tournant avec une énorme rapidité, s'échauffa au point d'obliger à interrompre le courant; au moment où le capitaine Renard manœuvrait le commutateur, l'anneau sautait, et le ballon, désemparé de sa machine, était entraîné sur Vélizy, où l'atterrissage eut lieu sans autre incident.

Cet insuccès, dû à un accident de machine sans importance, fit oublier la brillante démonstration du 9 août, et amena dans l'opinion publique un revirement irraisonné. Il fallait effacer cette mauvaise impression, et un nouvel anneau fut demandé à M. Gramme. Le 8 novembre 1884, le ballon, monté par MM. Renard et Krebs, s'éleva par un fort beau temps et se dirigea vers Boulogne (*fig. 11*); il vira au-dessus de Billancourt et fut ramené à Chalais avec une grande facilité : sous l'action de la pile entière, on atteignit une vitesse moyenne de 6,30 *m* (la route est représentée par un

trait plein). Dans l'après-midi, les aéronautes firent une nouvelle sortie et se contentèrent, à cause du brouillard, d'évoluer autour du parc sans le perdre de vue (la route est représentée par un trait discontinu); la chute d'une partie des fils des balais n'empêcha pas le ballon d'atterrir sur la pelouse des départs, mais la vitesse moyenne descendit à *4 m*.

Pour éviter d'autres mécomptes, le commandant Renard s'assura la collaboration de M. Gramme, qui construisit un moteur ayant le même poids que l'ancien, mais plus robuste et un peu plus puissant : cette dernière circonstance et l'allégement de diverses parties permirent d'emmener un troisième aéronaute et de se livrer à des mesures de vitesse. Ces expériences se firent en août et septembre 1885; je donnerai plus loin les formules auxquelles elles ont conduit; je me contente d'ajouter ici qu'elles furent exécutées par MM. Charles et Paul Renard, accompagnés de M. Duté-Poitevin, aéronaute civil attaché à l'Établissement militaire de Chalais. La dernière ascension, celle du 23 septembre 1885, faite en présence du ministre de la Guerre, donna le plus long parcours (*fig. 12*); le ballon partit vent debout et vint jusqu'à Paris, en décrivant une courbe élégante dont les inflexions régulières prouvent d'une manière frappante la puissance du moteur et la sûreté de la manœuvre. Après avoir franchi les fortifications, il retourna vent arrière à Chalais qu'il gagna en moins d'un quart d'heure; c'est dans cette ascension que la vitesse moyenne atteignit sa plus grande valeur, soit 6,50 *m*.

Le tableau suivant donne sommairement les sept ascensions du ballon *la France;* on voit que celui-ci revint cinq fois sur sept au point de départ.

DATES	NOMBRE de TOURS D'HÉLICE par minute	VITESSE moyenne du BALLON	REMARQUES
9 août 1884	42	4m80	Le ballon rentre à Chalais.
12 septembre 1884. .	50	5,70	Avarie de machine; descente à Vélizy.
8 novembre 1884. .	55	6,30	Le ballon rentre à Chalais.
8 novembre 1884. .	35	4,00	Id.
25 août 1885	55	6,30	Vent de 7m environ; descente à Villacoublay.
22 septembre 1885 .	55	6,30	Le ballon rentre à Chalais.
23 septembre 1885. .	57	6,50	Id.

Depuis, le commandant Renard n'a pas fait d'autres sorties. Il lui a suffi de démontrer aux gens de bonne foi que la direction des ballons n'est pas une utopie et d'effectuer les mesures utiles à de nouveaux essais. Après ces quelques mois de gloire, Chalais rentra dans le calme, et l'on nous dit qu'il veut y rester, les expériences annoncées pour le printemps prochain devant se faire sans bruit. Tout en appréciant les motifs de cette discrétion, je regretterais pour ma part qu'elle fût aussi complète, et j'émets ici le vœu qu'on donne au public éclairé toutes les explications qui ne constitueront pas un secret intéressant véritablement la défense nationale.

Voyons maintenant comment MM. Renard et Krebs sont parvenus à de tels résultats : « Nous avons été guidés dans nos travaux, disent-ils dans une note à l'Académie des sciences, par les études de M. Dupuy de Lôme relatives à la construction de son aérostat de 1870-1872, et de plus nous nous sommes attachés à remplir les conditions suivantes : stabilité de route obtenue par la forme du ballon et la disposition du gouvernail ; diminution des résistances à la marche par le choix des dimensions ; rapprochement des centres de traction et de résistance pour diminuer le mouvement perturbateur de stabilité verticale ; enfin, obtention d'une vitesse capable de résister aux vents régnant les trois quarts du temps dans notre pays. » Je vais exposer rapidement les moyens employés pour réaliser les conditions de dirigeabilité.

Légèreté du moteur. — Le moteur de 1884 était une machine Gramme que le commandant Krebs sut combiner de façon à obtenir une légèreté inconnue jusqu'alors : il avait une force de 8,5 *ch* et ne pesait que 100 *kg*. Le moteur qui le remplaça, et qui fut étudié avec le concours de M. Gramme, donnait 9 *ch* sous le même poids.

Le générateur d'électricité était une pile due aux savantes recherches du commandant Renard (1). On peut assimiler cette pile à un réservoir hydraulique contenant cinq fois plus de liquide que les piles au bichromate, et muni d'un jeu de robinets qui permet d'obtenir soit un débit abondant mais de courte durée, soit un débit faible mais prolongé ; l'expérience a montré qu'il est avantageux de placer ces robinets à 1 volt 25 au-dessous du niveau.

(1) *Les piles légères du ballon dirigeable « la France »*, par le commandant Renard. (Bibliothèque de la *Revue de l'Aéronautique*.)

La grande énergie totale de la pile Renard est due principalement à la substitution de l'acide chromique au bichromate, dont la base alcaline absorbe dans les réactions une portion de la liqueur excitatrice ; cette capacité atteint son maximum quand le rapport du poids de l'acide chromique à celui des acides hydrogénés est égal à 5/6 : elle est alors de 55 watts par décimètre carré de zinc et par heure. La gamme de débit s'obtient par la substitution partielle ou totale de l'acide chlorhydrique à l'acide sulfurique des piles au bichromate : l'énergie totale du mélange ne change pas, mais l'énergie par seconde augmente avec la proportion d'acide chlorhydrique et peut être quintuplée. Enfin, le commandant Renard étudia minutieusement l'influence des formes géométriques et la relation de position des deux électrodes.

Messieurs, il est superflu d'insister sur le mérite d'une pareille découverte qui augmente de moitié la capacité et quintuple la puissance des meilleures piles connues jusqu'à ce jour. C'est surtout à la pile Renard que la Science est redevable des belles expériences dont je vous ai entretenus, et l'on peut dire de cette

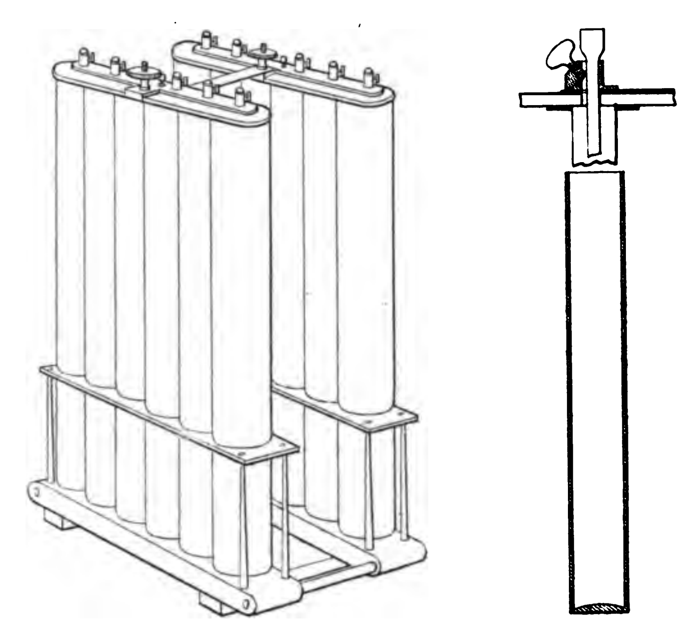


Fig. 13.

pile qu'elle est véritablement l'âme du nouveau dirigeable. J'ai représenté (*fig. 13*) un groupe de douze éléments réunis en sur-

face six par six ; ce groupe pèse 10 *kg*, et il en fallait 4 pour obtenir 1 *ch* sur l'arbre. Un crayon de zinc non amalgamé de très faible diamètre est entouré de la pièce polaire positive, formée par un cylindre en argent platiné de 1/10 de millimètre ; le tout vient plonger dans un cylindre en verre où se trouve la dissolution d'acide chromique dans la liqueur excitatrice.

Le moteur mettait en marche une hélice à deux branches de 7 *m* de diamètre dont l'arbre creux, d'une longueur d'environ 15 *m*, était installé sur des paliers oscillants maintenus en place par des tendeurs. Cet arbre prenait en tournant de curieux mouvements de flexion qui, d'ailleurs, ne produisaient pas de résistances anormales.

Résistance à l'avancement. — MM. Renard et Krebs étudièrent avec un grand soin les moyens de diminuer la résistance à l'avancement. L'allongement de leur ballon, dont la longueur était de 50,40 *m* et le volume de 1 861 m^3 *(fig. 14)*, égalait presque

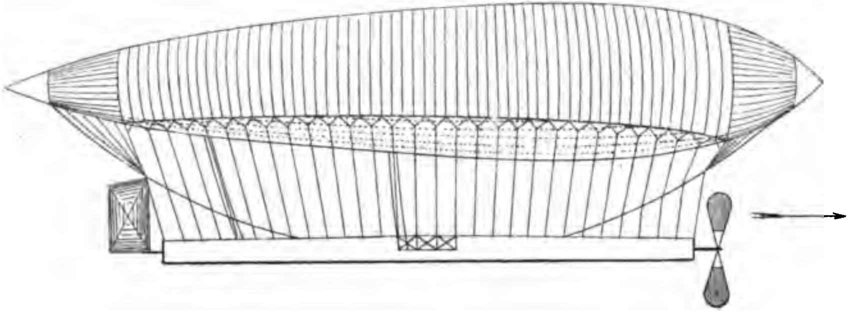


Fig. 14.

l'allongement du second ballon Giffard, mais sans compromettre la sécurité des aéronautes.

Le maître-couple était placé au 1/4 de la longueur à partir de la pointe avant. La méridienne se composait de deux arcs de paraboles ayant pour axe l'intersection du maître-couple avec le plan méridien. Cette forme dissymétrique, adoptée pour la carène des navires, convient également à celle des ballons dirigeables ; du reste la nature l'a donnée aussi bien aux oiseaux qu'aux poissons. Pour déterminer approximativement le rapport de la proue à la poupe, les officiers de Chalais construisirent des solides en ébonite de même longueur, mais dans lesquels le maître-couple avait des positions différentes ; on les fit tomber dans l'eau avec la même vitesse, et l'on choisit comme modèle du dirigeable celui

dont la descente eut lieu sans mouvements de lacet. Ce n'est là évidemment qu'un moyen de recherches très grossier.

Comme dans le ballon Dupuy de Lôme, un ballonnet à air de dimensions calculées permettait d'assurer l'invariabilité de formes, et une housse remplaçait le filet. Jusqu'alors on avait fait la housse avec des fuseaux semblables à ceux du ballon, ce qui forçait à la consolider par des rubans placés transversalement de façon qu'elle pût travailler dans ce sens ; le commandant Renard la forma de fuseaux transversaux et réalisa ainsi une notable réduction de poids.

La suspension par réseaux triangulaires indiquée par Dupuy de Lôme n'était plus suffisante avec l'allongement choisi ; afin d'éviter le renversement, les officiers de Chalais durent imaginer un autre dispositif dont ils n'ont pas fait connaître les détails, mais dont l'expérience a prouvé l'efficacité. Au lieu de passer par un même point nodal, les balancines furent groupées en deux faisceaux ; elles venaient s'attacher sur deux traversières qui partaient des pointes et s'attachaient vers le milieu de la nacelle. La longueur de celle-ci fut portée à 33 *m*, les suspentes qui la reliaient presque verticalement à la hausse étaient légères et courtes ; elles dessinaient à peu près deux plans parallèles à l'axe. Ce dispositif diminue singulièrement la résistance due aux cordages, qui atteignait *la moitié de la résistance totale* avec le système enchevêtré de Dupuy de Lôme ; de plus, il rapproche le centre de traction et le centre de résistance, et diminue par suite le moment perturbateur de la traction ; mais il diminue en même temps la stabilité du système, puisqu'il rapproche son centre de gravité et celui de la masse d'air déplacée.

La nacelle, formée de quatre bambous reliés par des entretoises en cordelettes de fer, était recouverte de soie parfaitement tendue, ce qui donne une résistance beaucoup moindre qu'avec des parois d'osier par exemple ; elle avait en son milieu une hauteur de 2 *m* et n'était pas accessible sur toute sa longueur ; les aéronautes se tenaient à hauteur des fenêtres ménagées sur les côtés.

Stabilité de route. — La forme dissymétrique du ballon, en éloignant le centre d'inertie de la pointe arrière, augmentait évidemment l'efficacité du gouvernail. Celui-ci était fait de deux étoffes de soie bien tendues sur un même cadre, mais très légèrement éloignées l'une de l'autre, de façon à constituer deux pyramides quadrangulaires de très faible hauteur accolées l'une à l'autre.

Les inventeurs n'ont pas donné les raisons qui leur ont fait adopter cette forme; pour ma part, je la trouve excellente, car elle me semble avoir pour effet de rendre la résistance de l'air sur le gouvernail sensiblement perpendiculaire au cadre, tandis qu'avec la forme ordinaire cette résistance produit, surtout aux grandes vitesses, une concavité plus ou moins accentuée du côté le plus éloigné du ballon, ce qui a pour effet de coucher sur l'axe du dirigeable la résultante de la pression de l'air sur le gouvernail.

De son côté, la dissymétrie du ballon contribue puissamment à assurer la stabilité de route. Soient en effet *(fig. 15)* XX' la route

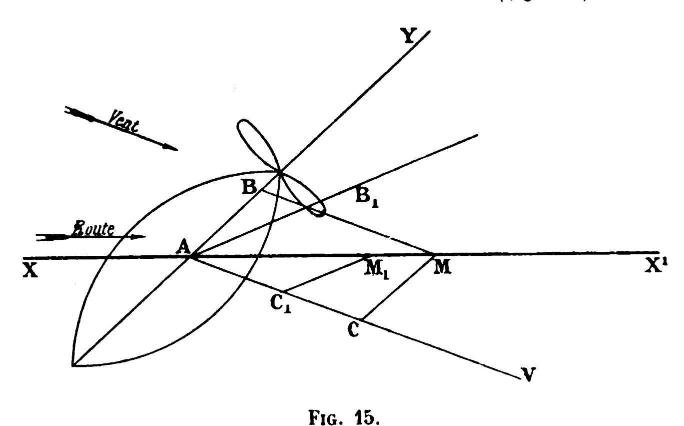


FIG. 15.

suivie, AV la direction du vent, AY celle du vent relatif (qui est celle du cap), AB la longueur figurative de la vitesse propre. En construisant le parallélogramme des vitesses, on trouve qu'il en résulte pour le vent une vitesse AC. Supposons que, brusquement, cette vitesse change et devienne AC_1. Dans l'instant très court qui suit cette variation le dirigeable, en vertu de la vitesse acquise, continue à suivre la route XX'; d'autre part, la vitesse propre conserve la même grandeur, puisque l'hélice continue à faire le même nombre de tours. Si donc nous traçons à partir du point C_1 une droite C_1M_1 égale à CM, nous obtenons la nouvelle direction du vent relatif. Frappé par ce vent relatif AB_1 qui n'est plus dirigé suivant son axe, le ballon se met à tourner autour de la verticale du centre d'inertie, de façon à se placer dans la direction du vent comme il y était en AB. Dans quel sens cette rotation se fera-t-elle? La proue se présente au courant tandis que la poupe s'efface; il est donc clair que dans les ballons symétriques *(fig. 16)* la poussée tendra à faire exécuter un tête-à-queue d'autant plus rapide que le bras de levier IH sera plus

grand. On peut au contraire combiner les dimensions d'un ballon dissymétrique (*fig. 17*) de façon que la poupe, malgré son efface-

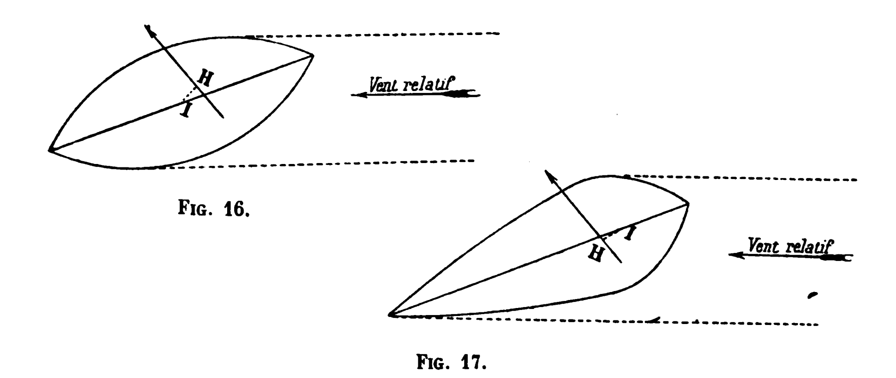


Fig. 16.

Fig. 17.

ment, reçoive la plus grande partie de l'effort du vent : il suffit pour cela qu'elle ait une longueur suffisante. La pression se présente alors comme l'indique la figure ; il n'y a donc pas à craindre de tête-à-queue, et quelques oscillations mettent tranquillement le ballon dans le nouvel axe du vent relatif.

Enfin, la place de l'hélice à la proue facilite la bonne tenue du dirigeable contre le vent. Quoi qu'on en ait dit, cette position est tout à fait judicieuse. Si l'on avait en effet à rouler sur un mauvais terrain une brouette ayant des brancards et une ossature flexibles, il n'est pas douteux qu'on la traînerait plutôt que de la pousser. Or n'est-ce pas le cas du ballon, machine faite d'étoffe souple, de cordages et d'osier, qui ne parvient à se déplacer dans l'air qu'au prix des plus grands efforts ? Du reste, l'hélice placée à la proue a l'avantage de mordre dans un air qui n'a pas encore été troublé par le passage du ballon (1).

(1) On pourrait, il est vrai, reprocher à l'hélice placée à l'avant de donner au fluide que va traverser le ballon une vitesse propre en sens contraire de la marche ; encore faudrait-il être bien fixé sur la variation qui en résulte pour la résistance, car la force centrifuge et la vitesse que prend l'air sous les palettes produisent sans doute une raréfaction suivant l'arbre de l'hélice. Il serait très intéressant de faire des expériences sur ces phénomènes ; je ne serais pas surpris qu'en mettant une hélice de forme et de dimensions convenables à l'avant d'un solide pisciforme (*fig. 18*), on fut amené à constater une diminution notable de la résistance. Supposons en effet une hélice plus grande que le maître-couple et une proue de faible longueur, de telle sorte que l'air soit raréfié entre

Fig. 18.

Il n'est pas jusqu'à la forme allongée de la nacelle qui ne contribue, en accusant la direction de la résistance minimum, à augmenter la stabilité.

Progrès obtenus et perfectionnements à réaliser. — De cette analyse un peu longue, il résulte que les officiers de Chalais-Meudon ont très heureusement rempli les conditions délicates imposées par la nature du problème. Seule la stabilité verticale n'avait pas été obtenue automatiquement bien que, si j'ai bonne mémoire, le commandant Renard l'eût étudiée autrefois.

Toutefois, on constata à diverses reprises des oscillations verticales de 2 à 3°, qu'on mit sur le compte d'irrégularités de formes ou de courants d'air locaux dans le sens vertical. Je les attribue pour ma part à la trop faible distance entre le ballon et la nacelle, d'où résultait une diminution du couple de stabilité qui devenait impuissant à éteindre par d'imperceptibles oscillations les mouvements de tangage produits par les variations du vent, l'instabilité verticale ou toute autre cause. La comparaison attentive des résistances mesurées dans les ascensions de 1885 avec celles qu'avait prévues Dupuy de Lôme, et qui se trouvèrent vérifiées dans leur ensemble par l'expérience de 1872, m'ont convaincu que les précautions multiples prises à Chalais pour diminuer la résistance à l'avancement n'ont pas donné tout le résultat qu'on pouvait en attendre. Je reviendrai plus loin sur ces considérations.

Pour mesurer les progrès accomplis par MM. Renard et Krebs, il suffit de jeter un coup d'œil sur le tableau suivant, où j'ai réuni les principales caractéristiques des ballons que nous avons examinés :

les filets *a a'* et comprimé au delà : d'une part la compression sur la proue sera moins grande et d'autre part l'air se refermera plus fortement sur la poupe, ce qui augmentera la récupération à l'arrière du travail dépensé à l'avant. Ainsi, non seulement on n'augmenterait pas la résistance en mettant l'hélice à la proue, mais on la diminuerait. Je dois ajouter qu'aucune expérience ne me met en mesure d'affirmer l'exactitude de ces vues.

Quoi qu'il en soit, le courant de l'hélice ne peut certainement produire qu'un faible accroissement de résistance dans les ballons dirigeables tels qu'on les construit actuellement, c'est-à-dire avec l'hélice sur le prolongement de la nacelle. Il n'y a donc pas d'inconvénient sérieux à la mettre en avant ; il y a au contraire un grand avantage à agir de la sorte, puisque la bonne tenue dans le sens de la marche en est facilitée.

	VOLUME	ALLONGEMENT	MAITRE-COUPLE	CHEVAUX SUR L'ARBRE	FORCE MOTRICE par 100 m^2 du maître-couple
	m^3		m^2	*chx*	*chx*
Giffard 1852.	2 500	3,6	113	3	2,65
— 1855.	3 200	7	78,5	3	3,82
Dupuy de Lôme	3 600	2,43	172	0,65	0,38
MM. Tissandier (1884) .	1 000	3,04	66,5	1,5	2,25
MM. Renard et Krebs. .	1 861	6	55,4	9	16,25

Ces progrès prennent une forme plus saisissante encore quand on compare les routes suivies par *la France* (*fig. 10, 11, 12*) à celle que MM. Tissandier ont parcourue en 1884 (*fig. 9*). Lorsque les officiers de Chalais entreprirent l'étude de leur dirigeable, la question en était au point suivant : les moteurs les plus légers donnaient 3 *m*, vitesse insuffisante puisque celle du vent lui est supérieure au moins une fois sur cinq; de plus, on n'avait pas encore réussi à éviter les embardées, à faire obéir le gouvernail, à assurer la stabilité de route. En quel état ont-ils rendu le problème? La vitesse atteint 6,50 *m*, le ballon obéit avec une merveilleuse docilité, sans tête-à-queue, il évolue comme un canot bien construit sur la surface tranquille des eaux.

Dans cette œuvre qui restera une des plus belles de notre siècle, il convient d'indiquer la part plus spécialement prise par chacun des deux collaborateurs. « L'exécution du programme et les études qu'il comporte ont été faites en commun. L'étude de la disposition de la chemise de suspension, la détermination du volume du ballonnet, les dispositions ayant pour but d'assurer la stabilité longitudinale du ballon, le calcul des dimensions à donner aux pièces de la nacelle, et enfin l'invention et la construction d'une pile nouvelle, d'une puissance et d'une légèreté exceptionnelles, ce qui constitue une des parties essentielles du système, sont l'œuvre personnelle du commandant Renard. Les divers détails de construction du ballon, son mode de réunion avec la chemise, le système de construction de l'hélice et du gouvernail, l'étude du moteur électrique calculé d'après une méthode nouvelle basée sur des expériences préliminaires permettant de déterminer tous ses éléments pour une force donnée sont l'œuvre du commandant Krebs, qui, grâce à des dispositions spéciales, est

parvenu à établir cet appareil dans des conditions de légèreté inusitées (1). »

Que reste-t-il à faire maintenant pour que la direction des ballons devienne réellement pratique? Il faut encore une fois doubler la vitesse en perfectionnant ce qui a été fait, en augmentant le volume, en réduisant la résistance, en élevant le rendement de l'hélice qui dans le ballon *la France* n'était que passable, et surtout en recherchant un moteur qui laisse loin derrière lui celui qui a conduit au succès.

On affirme que ce nouveau pas en avant vient d'être fait. Séparé de son collaborateur, actuellement commandant-ingénieur au corps des pompiers, le commandant Renard a parachevé la tâche qu'ils avaient d'abord poursuivie en commun. Ses recherches l'ont amené à imaginer un moteur à gazoline qu'on achève actuellement et qui pèsera, carburateur et accessoires compris, une fois et demie moins que le moteur de *la France;* de plus, au lieu d'être épuisé en une heure et demie de marche, il pourra fonctionner pendant une dizaine d'heures. Des perfectionnements réalisés dans les diverses parties du ballon permettront d'atteindre avec ce moteur la vitesse de 11 *m* par seconde ; le nouveau dirigeable, qui portera le nom du général Meusnier, pourra donc voyager avec une vitesse moyenne de 40 *km* à l'heure, allure des trains ordinaires. Il a un volume de 3 400 m^3 ; dans ces conditions on trouve que la longueur, pour qu'il fût géométriquement semblable à *la France*, devrait être $50,4\sqrt[3]{\frac{1\,861}{3\,400}} = 62,7$ *m*. Or, elle sera de 70 *m;* l'allongement dépassera donc celui de *la France*, peut-être même celui du deuxième ballon Giffard. Une housse portera, par l'intermédiaire de suspentes et de balancines, une nacelle de 40 *m* formée de bambous et de longerons en sapin évidés, avec entretoises en acier creux. L'hélice, de 9 *m* de diamètre, tournera à raison de 200 tours par minute.

Après le *Général-Meusnier* viendront d'autres appareils également en progrès sur les précédents. Ce que je voudrais examiner maintenant, ce sont les moyens de réaliser ce progrès.

La première qualité à obtenir est la stabilité de route ainsi que la docilité dans la manœuvre : sans cette qualité toutes les autres resteraient sans effet, et le ballon se trouverait dans la situation

(1) Note à l'Académie des Sciences.

d'un muet qui se sent des flots d'éloquence. Tel était en particulier le cas des ballons Giffard. J'ai soigneusement énuméré les conditions qu'il est nécessaire de remplir et j'ai dit comment on les avait réalisées à Châlons. Les ballons conçus d'après les mêmes principes seront à même de bien utiliser la puissance de leur moteur.

Dès lors leur valeur sera mesurée par la vitesse obtenue. Pour avoir une vitesse V, il faudra combiner le filet, la nacelle, le propulseur et le moteur de façon que

$$\frac{Tr}{R} = V,$$

T étant la force sur l'arbre de la machine, R la résistance à l'avancement qui correspond à la vitesse V, n le coefficient de réduction entre le travail de traction et le travail sur l'arbre : ce coefficient est fonction du rendement de l'hélice et des engrenages intermédiaires.

Les valeurs de R et de r dépendent l'une et l'autre de l'action de l'air sur les surfaces ; je consacrerai la deuxième Partie aux moyens de les évaluer et de rechercher leurs valeurs les plus avantageuses. Enfin, j'aborderai dans la troisième Partie la question des moteurs légers, qui a une importance capitale dans la navigation aérienne.

DEUXIÈME PARTIE

Résistance à l'avancement et propulsion.

La construction *rationnelle* des carènes et des hélices aériennes implique la connaissance complète des lois de la résistance de l'air. Il entrerait donc dans mon sujet de vous en entretenir avec détails, et je le ferais d'autant plus volontiers que ces lois ne sont pas sans intérêt pour l'Ingénieur, soit qu'il veuille utiliser cette résistance, par exemple dans les appareils où le vent est employé comme moteur, soit qu'il cherche à s'y soustraire, comme il doit le faire dans toutes les machines de locomotion atteignant une vitesse élevée. La diminution de la résistance de l'air intéresse en effet non seulement la navigation aérienne, mais encore, quoiqu'à un degré moindre, la navigation maritime et même la locomotion sur terre (1). Malheureusement, l'état actuel de nos connaissances sur la constitution des fluides ne permet pas d'établir la théorie mathématique des phénomènes qui s'y rattachent, et d'autre part la voie expérimentale n'a donné jusqu'ici que des résultats très incomplets. Je crois utile néanmoins de grouper ici ces résultats et d'en discuter brièvement la valeur.

(1) MM. Villemain, Guebhardt et Dieudonné ont indiqué pour les chemins de fer la formule

$$R = \frac{K}{1\,000} SV^2.$$

R est la résistance de l'air en kilogrammètres, S la surface de front en mètres carrés, soit 5 environ, et V la vitesse en kilomètres à l'heure; K a la valeur 2,5 pour les trains omnibus et 1,66 pour les directs et les express. On trouve ainsi que le travail absorbé par la résistance de l'air dans un express marchant à 80 *km* est de 57 *chx*. M. Ricour constata expérimentalement l'influence de la surface de front. Enfin, d'après les expériences récentes de M. Desdouits, Ingénieur des chemins de fer de l'État, la locomotive, qui reçoit directement le choc de l'air, absorbe à elle seule, pour un express marchant à 72 *km*, un travail effectif de 160 *chx*, soit *la moitié environ de la puissance utilisée*. M. Desdouits a constaté que cette perte considérable est due pour plus des 2/3 à l'influence de la vitesse, et que la presque totalité de la résistance produite par la vitesse est imputable à la réaction de l'air ambiant (*Revue générale des chemins de fer* de 1890). Il y a donc lieu de réduire soigneusement cette action dans la locomotion et la navigation à grande vitesse.

Pour les trains, il faut : 1° munir la locomotive d'une proue et peut-être le fourgon arrière d'une poupe; 2° enfermer dans une enveloppe lisse les dômes, cheminée, abri du mécanicien, etc., qui se trouvent sur la locomotive, et faire en sorte que les abris ne dépassent la silhouette des wagons que de la quantité strictement nécessaire, etc.; 3° réduire ou fermer par des panneaux les intervalles entre les voitures : il s'y produit en effet des remous qui augmentent la résistance d'une dizaine de kilogrammes par voiture de train express; à ce point de vue, l'adoption des bogies est très heureuse. Vous savez que ces perfectionnements sont prévus dans le chemin de fer électrique de notre collègue M. Heilmann.

Dans les navires à grande vitesse, on devra augmenter encore l'allongement de la coque

1. — Généralités sur la résistance de l'air

Lois admises pour le déplacement orthogonal. — On emploie généralement la formule $R = KdSV^2$ pour calculer la résistance R au déplacement orthogonal d'une surface plane S dans un air de densité d avec une vitessse V.

La proportionnalité de la résistance au carré de la vitesse, indiquée par Newton, fut longtemps regardée comme rigoureusement vraie : on croyait, en effet, à la simplicité des lois naturelles, et l'on ne pouvait suspecter un résultat aussi peu compliqué. Cependant, la loi de Newton n'est qu'approchée ; elle est même tout à fait inexacte pour certaines vitesses, et se trouve, par exemple, en désaccord complet avec les résultats obtenus par les Commissions de tir. La loi véritable est beaucoup plus complexe, et si l'on cherche à exprimer les résistances mesurées par une fonction de la forme $V^2 f(V)$, on trouve que la fonction $y = f(V)$ n'est pas représentée par une droite parallèle à l'axe des vitesses, mais par une courbe analogue à celle de la figure 20, avec un maximum dans le voisinage de la vitesse de propagation des mouvements ondulatoires dans l'air, ce qui semble confirmer l'idée originale de Robins et Hutton d'après laquelle le point $V = 340$ *m* serait une sorte de point critique. L'examen de la courbe $y = f(V)$ montre qu'on peut admettre la loi du carré de la vitesse en deçà de 100 *m* et au delà de 500 *m*, mais en choisissant pour K des valeurs différentes.

C'est Duchemin qui, le premier, introduisit le coefficient $f(V)$; mais ses calculs, basés sur des considérations d'élasticité, l'ont conduit à une expression du premier degré qui ne saurait repré-

et surtout rechercher un moyen pratique de réduire la résistance des nombreuses pièces qui surmontent le pont; il y aura lieu peut-être de les rassembler dans un réduit fermé par une enveloppe lisse à forme très effilée.

Enfin, on a imaginé pour les vélocipèdes une proue légère, formée de deux ailes à 50° qui couvrent le cycliste (*fig. 19*). Si l'on considère que, d'une part, la résistance de roulement du vélocipède est faible; que, d'autre part, l'action de l'air sur un homme penché en avant, c'est-à-dire présentant une surface concave dont la partie inférieure, les cuisses, est sans cesse en mouvement, on conçoit que cette innovation puisse être avantageuse. Dans une série d'essais sur route avec léger vent debout, on trouva qu'un même vélocipédiste se laissant descendre sur une pente sans toucher les pédales avait une vitesse moyenne de 20,45 *km* à l'heure sans l'appareil et de 25,45 *km* avec l'appareil. Par un fort vent debout et avec les grandes vitesses qu'on peut obtenir sur une piste, la pression de l'air est au moins dix fois plus forte que la résistance de roulement; dans ces conditions, la différence entre les vitesses obtenues avec ou sans coupe-vent deviendrait notablement plus grande.

Fig. 19

senter les résultats des expériences. On a récemment émis l'hypothèse que $f(V)$ était le coefficient qui exprime la variation de la densité produite par le passage du mobile. Cette hypothèse ne

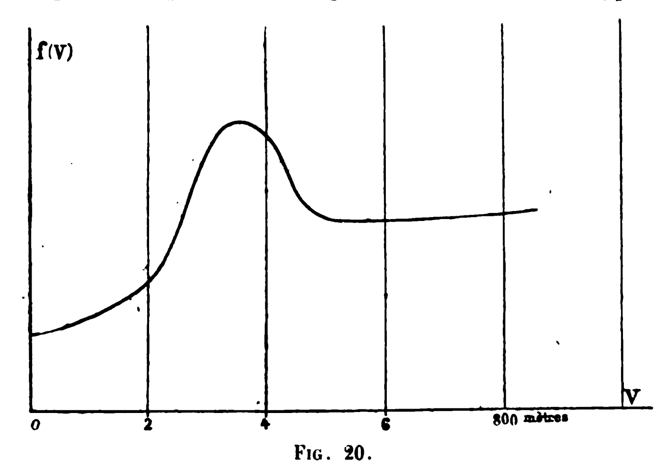


FIG. 20.

veut pas dire grand'chose, puisque la masse d'air ne se comprime pas uniformément, que même elle se dilate, comme nous le verrons, sur la face antérieure du mobile; en tous cas, cette explication n'apporte aucun renseignement sur la valeur de $f(V)$.

La proportionnalité de R à S n'est pas même justifiée. Il est bien évident, en effet, que la loi de déviation des filets d'air, et par suite la valeur de la résistance, ne sont plus les mêmes pour les grandes et les petites surfaces. Hutton, et plus tard d'Aubuisson, Hervé-Mangon, etc..., admirent la proportionnalité de R à $S^{1,1}$.

La forme même de la surface a son influence particulière, comme cela résulte clairement d'expériences faites par M. Marey, de l'Institut. Le savant physiologiste exécuta sur un disque entraîné par un manège (*fig. 21*) des mesures analogues à celles qu'avait faites Dubuat pour évaluer avec le tube de Pitot la pression aux différents points de la carène des navires. Marey plaçait devant un point quelconque du disque un tube qui communiquait par l'intérieur de l'axe du manège avec un manomètre différentiel de

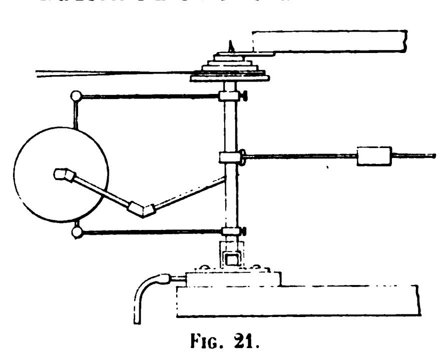


FIG. 21.

Kretz d'une très grande sensibilité. Quand le tube explorait la face antérieure du disque, le manomètre marquait constamment zéro; c'est qu'en effet d'une part la force centrifuge, en chassant l'air du tube, y produit une aspiration, et que d'autre part la même force, en comprimant l'air devant le disque, transmet cette compression à l'intérieur du tube : or l'aspiration et la compression, dues à la même cause, se compensent exactement. Par contre, si l'on plaçait le tube à l'arrière du disque, il s'y produisait une double aspiration due à la raréfaction que la rotation amène sur la face postérieure, et à l'aspiration produite par la force centrifuge dans le tube lui-même. Or, nous avons vu que cette aspiration est égale à la pression sur la face antérieure; par suite, le tube manométrique indiquait la somme des valeurs absolues de la pression sur la face antérieure et de l'aspiration sur la face postérieure, c'est-à-dire la pression réellement supportée par le disque au point exploré. Marey constata par ce procédé que la pression a une valeur sensiblement constante en tous les points du disque, sauf vers les bords, où l'on trouve une sorte de perte marginale qui est évidemment plus sensible pour les plans de petite étendue; à égalité de surface, cette perte a sa valeur minimum pour le cercle.

Ainsi la loi $R = KdSV^2$ n'est pas exacte, et l'introduction d'un coefficient $f(V)$, l'élévation de S à la puissance 1, 1, ne rendent qu'imparfaitement compte des résultats d'expériences. C'est qu'en réalité le phénomène est très complexe et qu'il ne suffit pas, pour l'exprimer par une loi même approchée, de s'en tenir à des abstractions mathématiques, comme faisait Poncelet (1) par exemple quand il admettait qu'une surface S, en effectuant dans l'air un parcours e à la vitesse V, imprimait cette vitesse aux molécules d'air du cylindre Se, ce qui donne :

$$\frac{1}{2}\frac{d}{g}SeV^2 = Re$$

d'où

$$R = \frac{d}{2g}SV^2.$$

Il est vrai que l'illustre géomètre se proposait seulement, comme le prouve le titre même de son ouvrage, de donner une formule qui suffit aux besoins ordinaires de la Mécanique industrielle.

(1) Poncelet. — *Introduction à la Mécanique industrielle.*

Conditions physiques. — Il faut donc, pour entrevoir les lois vraies du phénomène, se préoccuper des conditions physiques dans lesquelles il s'effectue.

Dans sa *Théorie mécanique de la chaleur*, Athanase Dupré a développé quelques considérations qui éclairent ce côté de la question. En cherchant une erreur dans un travail de Coriolis sur le rendement des moulins à vent, l'éminent professeur fut conduit à admettre qu'une surface plane frappée par un courant reçoit une pression moindre au repos que lorsqu'elle se déplace *dans son propre plan*.

A première vue ce résultat semble étrange, et, de fait, quelque formule qu'on applique, R conserve la même valeur quand la surface se meut dans son plan, puisque *d*, S et V ne changent pas. Il n'en est plus de même si l'on cherche à se rendre compte du mode d'écoulement de l'air sur la surface. Supposons en effet un disque AB au repos (*fig.* 22), et considérons deux molécules

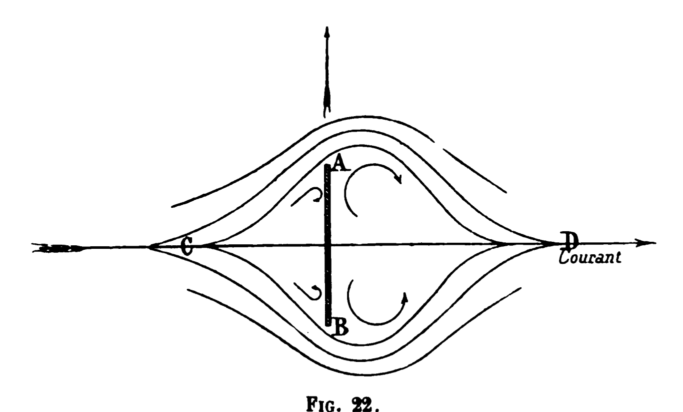


Fig. 22.

voisines destinées à passer l'une à droite, l'autre à gauche du disque ; elles doivent forcément se séparer en un point C. Il y a donc une masse d'air emprisonnée à l'avant entre les filets tels que CA, CB ; cette masse, dans laquelle il se fait certainement des remous, transmet sa compression à la face antérieure. Les molécules écartées viennent se rejoindre à l'arrière en un point D, mais leur passage plus ou moins rapide produit une succion, un appel d'air, d'où une aspiration sur la face postérieure qui augmente la pression supportée par le disque.

Celui-ci vient-il à se déplacer dans son propre plan ? Par suite de ce mouvement de tiroir, la masse gazeuse emprisonnée à l'avant s'échappe, déterminant un appel direct et, par suite, une

succion plus forte que précédemment ; l'aspiration sur la face postérieure augmente donc, et il en est de même de la pression sur la face antérieure, qui reçoit le choc direct des molécules, puisqu'il n'y a plus de matelas d'air interposé. Pour ces deux raisons, le déplacement transversal augmente la pression.

Valeurs de Kd. — De ce qui précède résulte clairement que la résistance dépend de la forme de la surface, et même, pour une surface donnée, du rapport entre cette surface et la vitesse. C'est ce qui avait conduit M. Goupil à imaginer la formule :

$$R = KdSV\sqrt{V^2 + S}.$$

Il est à prévoir que la formule exacte est beaucoup plus compliquée. On s'explique donc qu'en adoptant la loi $R = KdSV^2$, les différents expérimentateurs aient obtenu pour Kd les valeurs les plus diverses, comme le montrent les lignes suivantes, où l'on a pris $d = 1,293$:

Poncelet (formule théorique)	0,067
Piobert et Morin.	0,084
Goupil.	0,130
Marey	0,130
Commandant Renard	0,085
Langley	0,08475
Cailletet et Collardeau.	0,071

Dans l'enseignement de Chalais on admit d'abord $Kd = \frac{1}{8} = 0,125$; mais, à la suite de quelques travaux faits par le commandant Renard, on prit $Kd = 0,085$, valeur qui concorde bien avec les expériences de Piobert et de Morin, ainsi qu'avec les mesures très habiles exécutées en Amérique par M. Langley. Marey ne tint pas compte des pertes marginales et supposa que la pression aux différents points du disque était la même que la pression mesurée au centre ; il n'est donc pas étonnant qu'il ait obtenu un coefficient plus fort que ceux des autres expérimentateurs. Quant à MM. Cailletet et Collardeau, ils font remarquer que les coefficients obtenus avant eux résultent d'expériences dans lesquelles la surface est entraînée par un manège ; l'air étant chassé par la force centrifuge, le fluide que traverse la surface est à chaque instant animé d'un mouvement transversal par rapport à celle-ci ; or les théories de Dupré, vérifiées par l'expérience, montrent que la résistance est plus grande que si l'air était au repos. MM. Cailletet et

Collardeau ayant opéré en ligne droite, en s'installant sur la tour Eiffel, estiment que leur coefficient doit être seul appliqué au déplacement orthogonal.

Réaction de l'air sur un plan qui fait un angle α avec sa trajectoire. — La confusion est encore bien plus grande quand le plan, au lieu de se mouvoir orthogonalement, fait un angle α avec sa trajectoire. On admet généralement que la réaction N de l'air est normale au plan et égale à la résistance au déplacement orthogonal R multipliée par le carré du sinus de l'angle d'obliquité. Quelques expérimentateurs, Borda et Pénaud en particulier, ont pensé que N était proportionnel au nombre des molécules qui frappent la surface, soit à sin α. Mais les résultats d'expériences sont en désaccord aussi bien avec la formule du sinus simple qu'avec celle du sinus carré. Duchemin et Bossut ont employé la suivante :

$$N = R \frac{2 \sin \alpha}{1 + \sin^2 \alpha}$$

qui cadre mieux avec les mesures expérimentales. Enfin, la discussion approfondie des travaux de Vince, Hutton et Thibaut conduisit le commandant Renard à prendre

$$N = R[a \sin \alpha - (a - 1) \sin^3 \alpha],$$

a étant un coefficient plus grand que 1, et probablement égal à 2.

Le choix entre la formule du sinus carré d'une part, et les autres formules d'autre part, a une importance capitale en Aviation, ainsi que je vais l'indiquer en quelques mots.

En 1830, Navier, admettant que la sustentation de l'oiseau est produite par les battements orthogonaux des ailes, évalua à 1 *ch* le travail de 13 hirondelles. S'il en était ainsi, nous aurions depuis longtemps remplacé par des volatiles les chevaux de nos fiacres, au grand contentement des gens pressés. Les calculs de Navier sont donc la condamnation de la théorie dite orthogonale qui, cependant, conserve encore quelques adeptes, malgré les autres objections qu'on peut lui opposer (1).

(1) En particulier, cette théorie ne rend pas compte de la nécessité qu'éprouvent tous les oiseaux à acquérir, par le saut ou la course, une vitesse sans laquelle il leur est impossible de voler. C'est sur ce fait bien connu que sont basées la capture du condor dans l'Amérique du Sud et la chasse à l'outarde en Russie : pour la première, on met un appât dans une enceinte formée par une sorte de haie ; pour la seconde, on poursuit l'oiseau par les temps de verglas. Dans nos campagnes, on emprisonne souvent des geais dans une cage sans couvercle, composée parfois d'une douzaine de piquets plantés en terre.

De plus, d'après la théorie orthogonale, l'oiseau n'éprouverait aucune difficulté à voler à reculons, et il serait étrange, s'il en était ainsi, qu'on n'eût jamais observé ce genre de vol.

Dans ses belles expériences sur le vol des oiseaux, Pénaud, et après lui M. Drzewiecki, le commandant Renard, etc., ont été amenés à considérer les ailes comme des surfaces traînées dans l'air sous un angle α très petit; les battements n'ont pour but que d'entretenir la vitesse horizontale, grâce surtout à la pointe de l'aile qui constitue un excellent propulseur; celui-ci agit à la façon de la corde des cerfs-volants et produit la sustentation par la réaction du courant d'air relatif sur le dessous des ailes. Or, quand on applique le calcul au vol ainsi considéré, on trouve que la loi du sinus carré donne pour le travail une expression indépendante de l'angle α qui est précisément celle de Navier. Le résultat ne laisse pas d'être compromettant pour cette loi, puisqu'elle ne tend à rien moins qu'à empêcher les oiseaux de voler.

Avec les trois autres lois, on trouve au contraire que le travail de sustentation est fonction de l'angle et tend vers zéro en même temps que lui. Il faut bien qu'il en soit ainsi pour que certains oiseaux traversent les mers sans se reposer; il n'est pas douteux que le travail musculaire, qui peut être momentanément très considérable, à l'essor par exemple, est excessivement faible en cours de route.

Ce qui précède infirme la loi du sinus carré, mais ne confirme nullement aucune des autres lois. Il est même certain que ces lois ne représentent pas fidèlement la réalité et que le facteur en α dépend aussi de la forme de la surface; ainsi, pour un ruban allongé dans le sens des ailes d'un oiseau (*fig. 23*), ce facteur se rapproche

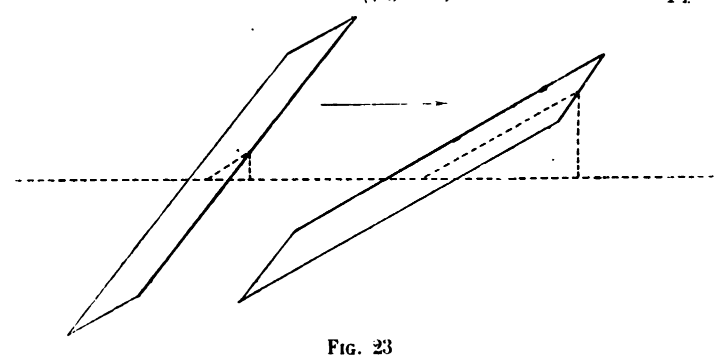


Fig. 23

du sinus simple; il est à peu près égal au sinus carré pour un ruban longitudinal (1). Aucune des formules données ne rend compte de ces particularités

(1) Commandant Renard. — Communication à la Société française de physique, janvier 1889.

Tentative pour séparer la pression à l'avant et l'aspiration à l'arrière. — Le premier, Athanase Dupré a tenté de rechercher quelle part revient à la compression sur la face avant et à l'aspiration sur la face arrière dans la pression totale supportée par un plan. Voici à peu près le raisonnement qu'il fit :

Supposons une masse d'air à la pression p_o dans laquelle se déplace orthogonalement une surface S avec la vitesse V. Dupré considérait qu'à partir du moment où le régime d'écoulement est établi, il y avait équilibre entre le gaz *acb* emprisonné sur la face antérieure *(fig. 24)*, qui prenait par conséquent la vitesse V, et la partie de l'air demeurée immobile. Or Navier a établi que deux molécules d'une même masse gazeuse ont des vitesses u_1 et u_2, qui s'expriment en fonction de leurs pressions respectives p_1 et p_2 par la formule

FIG. 24

$$u_2^2 - u_1^2 = \frac{2gp_o}{d}\frac{T}{273} \log \text{nép} \frac{p_1}{p_2},$$

en supposant toutefois que la résistance du plan ne modifie pas la température de la masse fluide. Les hypothèses de Dupré et de Navier combinées donnent pour la pression p' du gaz sur la face antérieure

$$p' = p_o e^{bV^2}$$

avec

$$b = \frac{d}{2gp_o}\frac{273}{T}.$$

Par suite la pression sur la face antérieure, qui est p_oS au repos, devient

$$p_oSe^{bV^2}.$$

Pour voir l'effet de cette pression à l'avant, supposons que tout reste à l'état en l'arrière, c'est-à-dire que l'air y garde partout la pression p_o. L'avant subit une pression $p_oSe^{bV^2}$; l'arrière, une pression moindre p_oS : il y a donc du côté de la face antérieure une compression $p_oS(e^{bV^2} - 1)$ qui résiste à l'avancement.

On verrait de même que la face arrière supporte une pression $p_oSe^{-bV^2}$. En supposant encore, pour voir l'effet de cette pression, que tout reste en l'état à l'avant, il en résulte, puisque

$e^{-bV^2} < 1$, qu'il y a du côté arrière une aspiration $p_o S(1 - e^{-bV^2})$ qui concourt à augmenter la résistance à l'avancement.

La résistance totale est donc:

$$R = \underbrace{p_o S(e^{bV^2} - 1)}_{\text{Compression à l'avant.}} + \underbrace{p_o S(1 - e^{-bV^2})}_{\text{Aspiration à l'arrière.}}$$
$$= p_o S(e^{bV^2} - e^{-bV^2}).$$

D'après cela, la résistance $a'b'$ (*fig.* 25) due à l'aspiration serait inférieure à la résistance ab due à la compression, mais en différerait peu aux faibles valeurs de bV^2, qui intéressent précisément la direction des ballons en son état actuel. Aux très grandes vitesses, au contraire, l'aspiration serait négligeable devant la compression.

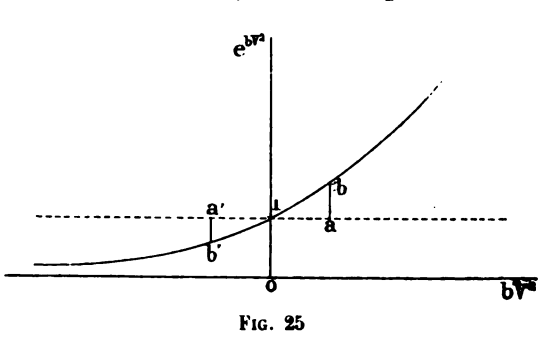


FIG. 25

Malheureusement cette théorie prête beaucoup à la critique. Il est bien évident que la pression de l'air ne peut passer brusquement de la valeur p_o à la valeur p' en franchissant la ligne acb : elle varie au contraire graduellement d'une molécule à l'autre, de sorte qu'il faudrait avoir des données moins sommaires sur la constitution moléculaire des fluides pour édifier la théorie mathématique des phénomènes considérés. De plus, la déduction d'après laquelle l'aspiration à l'arrière serait toujours plus petite que la compression à l'avant est en désaccord avec les idées d'esprits éminents, comme d'Alembert et peut-être comme Athanase Dupré lui-même, qui n'avait pas vu cette conséquence de son raisonnement.

On voit du reste combien les hypothèses précédentes sont incomplètes, dès qu'on veut appliquer le même procédé d'analyse au cas d'une surface faisant l'angle α avec la direction du mouvement. Le commandant Vallier, membre correspondant de l'Académie des sciences, s'est contenté de remplacer dans la formule de Dupré la vitesse V par la composante V sin α normale au plan. Cette manière de procéder n'est nullement justifiée ; si même on suit le raisonnement de Dupré, on trouve que les molécules em-

prisonnées devant le plan oblique, et par suite entraînées avec la vitesse V, exerçant à l'avant une pression $p_0Se^{bV^2}$ normale au plan : il s'ensuit que la résistance à l'avancement serait $p_0Se^{bV^2}$ sin α. De même la résistance à l'arrière serait $p_0Se^{-bV^2}$ sin α ; de sorte que la résistance au déplacement oblique égalerait la résistance au déplacement orthogonal multipliée par sin α : c'est la loi du sinus simple donnée par Borda.

En résumé, on est peu fixé sur la loi du déplacement orthogonal, mais cependant on peut admettre la formule $R = KdSV^2$ pour les vitesses qui intéressent l'Aéronautique. Quant à loi du déplacement oblique, on l'ignore complètement ; il convient donc de considérer les différentes lois énoncées comme de simples formules empiriques.

2. — Résistance a l'avancement

Évaluation de la résistance. — Dupuy de Lôme évalua la résistance de son dirigeable en appréciant séparément celle qu'éprouvaient les diverses parties. A cet effet, il mesura pour chacune d'elles la section maximum perpendiculaire à l'axe du ballon, puis il calcula la résistance au déplacement orthogonal de ces sections, et enfin il affecta les résistances obtenues de coefficients choisis d'après la nature et la forme des parties considérées. C'est ainsi qu'il dressa le tableau suivant :

	SURFACE de la SECTION MAXIMUM perpendiculaire à l'axe du ballon	RÉSISTANCE par mètre carré à la vitesse de 2,22 m	COEFFICIENTS de RÉDUCTION	PRODUITS
	m^2	kg		kg
Ballon sans filet.	172 »	0,665	1/30	3,830
Nacelle	3,25	»	1/5	0,432
Saillie du corps des hommes.	3 »	»	1/5	0,400
Tuyaux à hydrogène et à air	6,40	»	1/5	0,850
Petit cordonnet des filets. .	10 »	»	1/2	3,325 } 5,519
Cordes fortes des suspentes et des balancines.	9,90	»	1/3	2,194 }
	Résistance totale			11,031

Le rapport de la résistance totale a la résistance du maître

couple est donc $\frac{11,031}{30 \times 3,830} = \frac{1}{10}$ environ. Ce coefficient est voisin de celui qu'on emploie dans la Marine pour calculer la résistance à l'avancement d'après celle qu'éprouverait le maître bau ; on prend en effet :

Pour un navire très fin, avec carène doublée en cuivre, et propre . . . . $\frac{1}{15}$

Pour un navire à forme pleine, avec carène doublée en cuivre et mal entretenue . . . . $\frac{1}{9}$

Par analogie avec une pratique courante dans les constructions navales, on a proposé d'évaluer la résistance à l'avancement en multipliant la résistance du maître couple par un coefficient pouvant varier de $\frac{1}{10}$ à $\frac{1}{15}$ et même à $\frac{1}{20}$, suivant l'allongement. A mon avis, c'est mal comprendre les enseignements du tableau qui précède ainsi que les différences entre les bateaux et les ballons dirigeables. En effet, la résistance étant proportionnelle à la densité des fluides, les parties d'un bateau qui ne sont pas immergées opposent à l'avancement une résistance qui n'est qu'une faible fraction de la résistance totale. Celle-ci dépendra donc à peu près exclusivement, pour une ligne de flottaison déterminée, de la forme et de la nature de la coque : ce qui justifie l'emploi du coefficient de réduction dont j'ai parlé. Il n'en est plus de même avec un ballon ; dans ce cas, en effet, toutes les parties se déplacent dans le même fluide, de telle sorte que, suivant les évaluations mêmes de Dupuy de Lôme, la résistance du ballon proprement dit entre pour moins du tiers dans la résistance totale, alors que celle des cordages y entre pour *moitié*. Au point de vue de la résistance, la forme et la longueur du filet sont donc au moins aussi importantes que celles du ballon, et l'emploi d'un coefficient de réduction n'est possible qu'avec des ballons géométriquement semblables ou du moins ne différant que très peu les uns des autres

Par suite il y a lieu d'effectuer pour chaque projet de dirigeable des calculs analogues à ceux de Dupuy de Lôme. Mais en raison de l'incertitude sur la véritable valeur des divers coefficients qu'il a employés, il sera très utile de contrôler les chiffres obtenus par des mesures directes faites dès les premières ascensions ; les résultats corrigés pourront à leur tour servir de base dans les

projets ultérieurs. C'est ainsi que les mesures faites à bord de *la France* donnèrent des résistances supérieures à celles qu'on avait prévues sur la foi des résultats antérieurs et d'expériences très incomplètes effectuées à terre. L'écart constaté résulte sans doute de deux causes : d'une part, les coefficients de réduction adoptés par Dupuy de Lôme doivent être un peu faibles, en particulier le coefficient $\frac{1}{30}$ du ballon ; d'autre part, les mesures effectuées à Châlais ont sans doute été viciées, comme je l'ai dit, par le couple perturbateur dû à la traction et par l'instabilité verticale.

Il convient de remarquer ici que la résistance par mètre carré, inscrite à la deuxième colonne du tableau précédent, varie proportionnellement à la densité de l'air, et par conséquent suivant la loi de décroissance de la pression barométrique. Or on évalue la résistance totale afin de déterminer l'effort de traction qu'il faut exercer pour obtenir une vitesse donnée. Mais cet effort diminue lui aussi avec la densité, car l'hélice mord dans un milieu plus léger. On peut donc prendre dans les calculs la pression atmosphérique à terre : l'erreur qui en résulte n'est jamais très grande, puisque les dirigeables sont faits pour évoluer à de faibles hauteurs.

Diminution de la résistance. — On croit généralement que la diminution de la résistance sera obtenue surtout par l'exagération croissante de l'allongement. C'est là une erreur. Si l'on admet en effet les chiffres de Dupuy de Lôme, on voit qu'en réduisant à *zéro* la résistance du ballon, on ne diminue la résistance totale que des $\frac{2}{7}$ environ ; encore n'est-ce pas là un bénéfice net, puisque le nombre des suspentes, et par suite la résistance due au filet, augmente avec l'allongement.

Pour que la diminution due à l'allongement soit efficace, il faut qu'on réduise parallèlement la résistance de la nacelle et celle du filet, sans compromettre toutefois la rigidité et la stabilité de route. J'ai montré quels progrès le ballon de Chalais a réalisés dans cette voie.

On se rendrait facilement compte, en faisant cette étude pour chaque projet de ballon dirigeable, qu'il serait maladroit de dépasser une certaine valeur de l'allongement. En effet, considérons un disque dont la résistance au mouvement orthogonal est R_0 pour une vitesse V; supposons que nous le munissions d'une

proue et d'une poupe de longueur l et Kl, K étant un nombre constant. En négligeant le frottement de l'air, il est clair que la résistance à l'avancement est une fonction $f(l)$ qui décroît constamment de R à zéro quand l croît de zéro à ∞. Mais il est non moins évident que le frottement est une fonction $\varphi(l)$ qui croît avec l et devient même proportionnelle à l à partir d'un certain

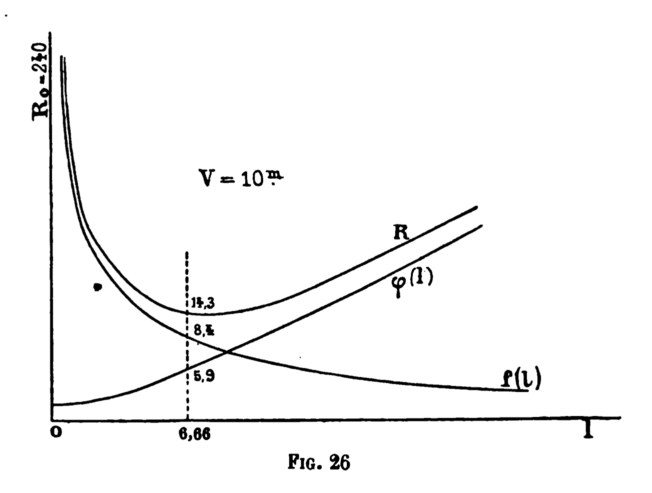


Fig. 26

allongement, de sorte que la résistance totale est une courbe à minimum, asymptote à la courbe du frottement (*fig. 26*).

Dans un de ses premiers brevets, Giffard a mis en évidence les deux termes dont se compose la résistance ; la formule qu'il donne est la suivante :

$$R = KSV^2 + h\,\Sigma V^2,$$

S étant la surface du maître couple et Σ la surface latérale. Giffard indique que, pour un diamètre du ballon égal à 6 *m*, une longueur de 40 *m* et une vitesse de 10 *m*, on a $K = \frac{0{,}045d}{2g}$ et $R = 14{,}3$ *kg*. On en déduit $f(6{,}66) = 8{,}4$, $\varphi(6{,}66) = 5{,}9$ avec $R_0 = 0{,}085\ SV^2 = 240$. Telles sont les valeurs dont on s'est servi dans le tracé de la figure précédente, qui n'a évidemment d'autre prétention que celle de faire entrevoir l'allure de la loi.

Ainsi, pour une vitesse et un rapport de proue à poupe déterminés, il existe un allongement donnant le minimum de résistance. Or, l'allongement a le grave inconvénient de diminuer beaucoup la force ascensionnelle par unité de volume, de rendre

la liaison avec la nacelle plus délicate, d'exagérer la résistance à l'avancement dès que se produisent des mouvements de tangage même légers, et, enfin d'obliger — ce qui précisément augmente la résistance — à allonger la nacelle et à mettre un plus grand nombre de suspentes, pour que le poids se répartisse bien sur le ballon. Dans ces conditions, on conçoit qu'il y ait le plus souvent intérêt à ne pas atteindre la valeur l qui donne la résistance minimum.

En ce qui concerne les suspentes, on a proposé l'emploi des fils métalliques, afin d'en diminuer le nombre; mais il faut remarquer qu'en dehors des inconvénients propres à la nature même de ces fils, un trop grand écartement des suspentes empêcherait la bonne répartition du poids sur la housse de suspension. Par contre, il semble avantageux de réduire la longueur des suspentes; toutefois, cette réduction ne doit pas être faite à la légère, car le rapprochement du ballon et de la nacelle peut compromettre la bonne tenue du dirigeable, ainsi que je vais le montrer.

Tangage et couple de rappel. — Soient G le centre de gravité de tout le système et g le centre de gravité de la masse d'air dont il occupe la place (*fig.* 27). Quand le moteur ne fonctionne pas, la droite Gg est verticale; mais si le ballon s'incline, la droite Gg s'incline du même angle, puisque le système est rigide. Il en résulte, d'une part, une augmentation parfois notable de la résistance, et d'autre part des mouvements de tangage quand la force de traction varie. D'après mes calculs, le rapport entre la résistance pour une petite inclinaison i et la résistance pour une inclinaison nulle peut se représenter approximativement, dans le cas d'un ballon symétrique, par la formule :

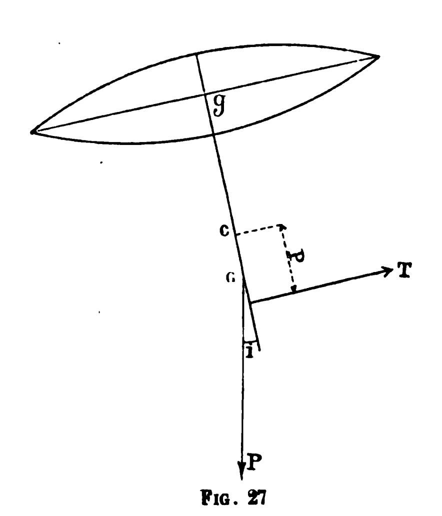


Fig. 27

$$\frac{R_i}{R} = 1 + l^2 \sin^2 \frac{i}{2},$$

l étant l'allongement du ballon. Pour que la résistance soit doublée, il suffit que l'on ait $\sin\frac{i}{2}=\frac{1}{a}$, ce qui donne 4°40 pour le ballon de Dupuy de Lôme, 2°20 pour un ballon ayant un allongement de 5, etc. Il importe donc, pour un ballon déterminé, que l'amplitude des oscillations ne puisse dépasser une certaine valeur I. Or, le couple qui enraie la rotation, ou couple de rappel, est égal dans un ballon de poids P à $P \times Gg \times \sin i$. On doit donc calculer Gg de façon que l'inclinaison ne devienne pas supérieure à I.

Parmi les causes qui peuvent produire cette inclinaison, les principales sont les deux suivantes :

1° La première est l'instabilité verticale. Comme je l'ai déjà dit, c'est à elle qu'il convient d'attribuer en partie les oscillations de 2 à 3° que MM. Renard et Krebs ont constatées à diverses reprises. Il suffit en effet, pour obtenir une oscillation de 3°, que la vitesse du mouvement ascendant ou descendant soit de $6 \times \operatorname{tg} 3° = 0{,}312\ m$ pour une vitesse de marche de 6 *m*.

Ainsi donc, l'amplitude des oscillations est proportionnelle à la vitesse propre du ballon. Il en résulte que la stabilité verticale, si désirable dans les dirigeables à faibles vitesses qu'on a construits jusqu'ici, sera beaucoup moins importante à réaliser pour des ballons ayant des vitesses de 20 *m* et au-dessus ;

2° La deuxième cause est due à ce que, en raison des difficultés qu'on éprouve à placer l'arbre de l'hélice en dehors de la nacelle, il y a une distance d entre cet arbre et le centre de résistance. Quand on met le moteur en marche, le système s'incline donc sous la traction T de l'hélice d'un angle i_0 tel que

$$Td = P \times Gg \times \sin i_0$$

d'où

$$\sin i_0 = \frac{T}{P} \times \frac{d}{Gg}$$

Si l'on modifie T, il en résulte des variations de l'angle qui produisent le tangage. Or, ces variations sont évidemment d'autant plus sensibles que l'angle i_0 est lui-même plus grand.

Dupuy de Lôme a calculé que dans son ballon le maximum de i_0 n'atteignait pas 1/2 degré ; ce maximum correspond au minimum de Gg, c'est-à-dire au cas où le lest est jeté et le ballon complètement gonflé. Les variations étaient donc insignifiantes.

Mais i_0 augmente quand le poids par cheval ϖ diminue. En

effet, soit P_0 le poids du ballon, moteur non compris, on a $\frac{P}{T} = \varpi + \frac{P_0}{T}$; quand le poids par cheval diminue, il en est de même du rapport $\frac{P_0}{T}$, soit qu'on augmente la traction du ballon sans changer son poids, soit qu'on diminue ses dimensions de façon à conserver les mêmes vitesses. Or, on tend dans les ballons dirigeables à employer des machines de plus en plus puissantes, de telle sorte que ϖ est supérieur à $\frac{P_0}{T}$; d'autre part $\frac{P_0}{T}$ varie dans le même sens que ϖ : on peut donc admettre que $\frac{T}{P}$, et par suite sin i_0, varie en raison inverse du poids par cheval.

Par conséquent, pour que i_0 ne dépasse pas la valeur qu'on s'est assignée, il est nécessaire de réduire en conséquence le rapport $\frac{d}{Gg}$. Il y a, semble-t-il, un moyen bien simple d'annuler ce rapport ; c'est de faire passer l'arbre de l'hélice par le centre de résistance : le couple perturbateur est supprimé et les mouvements de tangage dus à l'instabilité verticale disparaîtront avec une propulsion énergique.

Quoi qu'il en soit, on ne peut mettre la nacelle trop près du ballon, car il faut laisser au couple de rappel une valeur capable d'éteindre les oscillations fortuites qui peuvent se produire, par exemple sous l'action d'un courant d'air qui n'est pas horizontal. Du reste, il est extrêmement difficile de faire passer l'arbre de l'hélice par le centre de résistance. Un des dispositifs proposés consiste à mettre dans le plan horizontal qui contient ce point deux hélices symétriques par rapport au ballon ; mais il est impossible, avec des vitesses de rotation un peu fortes, de bien fixer les coussinets des arbres sans qu'il en résulte une augmentation notable du poids. Quant au procédé qui consiste à placer l'hélice entre deux ballons, il diminue la force ascensionnelle, augmente certainement la résistance et se heurte aux mêmes difficultés que le premier procédé, car le centre de résistance ne se trouve pas, à beaucoup près, dans le plan qui contient les axes des deux ballons.

Forme à donner au ballon proprement dit. — En résumé, on doit donner au filet une hauteur suffisante, et comme il entre pour

une fraction notable dans la résistance à l'avancement, on se rend compte qu'au delà d'une certaine valeur l'allongement ne diminue pas d'une façon sensible la résistance qui est propre au ballon.

Mais il n'y aurait pas les mêmes inconvénients à diminuer cette résistance par la forme du dirigeable. On peut donc se proposer le problème suivant : quelle est, pour une longueur déterminée, la forme qui donne la résistance minimum, *à égalité de force ascensionnelle ?*

Le problème étant ainsi posé, on voit que le maître couple est minimum pour une surface de révolution dont la méridienne est un arc de cercle. Mais là se bornent les renseignements du calcul, car si l'on applique à un élément de la surface une quelconque des formules de la résistance de l'air et qu'on cherche ensuite à évaluer la résistance totale par les procédés du calcul intégral, on obtient des résultats qui n'ont aucune signification. En effet, les formules donnent en bloc la résistance de l'air sur un plan, sans séparer la compression sur la face antérieure de l'aspiration sur la face postérieure. Or l'élément de surface n'est plus dans les mêmes conditions, puisque l'air ne le frappe que d'un côté. Si donc on voulait déterminer par le calcul la résistance au déplacement d'un corps, il faudrait tout d'abord opérer cette séparation, ce qu'on n'a pu faire jusqu'ici. On voit combien dans ces délicates recherches il faut se défier des abstractions mathématiques et se préoccuper des conditions physiques des phénomènes.

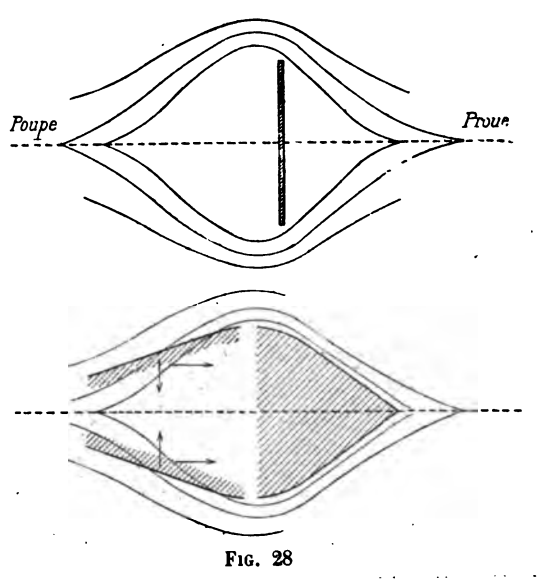


Fig. 28

Le rôle évident de la proue est d'écarter le fluide sans brusquerie, d'éviter l'emprisonnement de l'air ainsi que les remous qui en résultent. La poupe doit empêcher l'aspiration à l'arrière, en remplissant le vide partiel créé par le passage de la proue, afin que la compression à l'avant ne vienne pas s'augmenter de l'aspi-

ration sur la face postérieure (*fig.* 28); il semble même que son rôle peut être plus efficace encore, et qu'elle doit non seulement remplir le vide, mais encore pénétrer dans les veines fluides en les coupant sous un angle convenable; de cette façon elle se fait serrer comme le coin par les lèvres qu'il a écartées, elle provoque une composante dans le sens de la marche et récupère une partie du travail dépensé par la proue.

N'en est-il pas ainsi pour les poissons et pour les oiseaux, et n'est-il pas évident que cette récupération est presque totale pour les volateurs qui traversent les mers sans prendre le moindre repos? Comment expliquer autrement d'aussi longs parcours? Bien qu'aucune espèce animale ne puisse produire pour sa locomotion autant de travail que l'oiseau (1), ce travail ne peut être que très faible quand le vol est longtemps soutenu.

Puisque la récupération à l'arrière du travail dépensé à l'avant paraît excellente chez les poissons et chez les oiseaux, il y a sans doute intérêt à étudier leur forme. Celle-ci peut se représenter schématiquement par les figures 29; pour les poissons, la figure supérieure représente la projection verticale, de telle sorte que les changements de direction s'obtiennent par des mouvements de la queue; pour les oiseaux, la même figure représente la projection horizontale, de telle sorte que la queue aide les ailes à obtenir et à régler la sustentation; les changements de direction s'obtiennent en avançant une aile par rapport à l'autre.

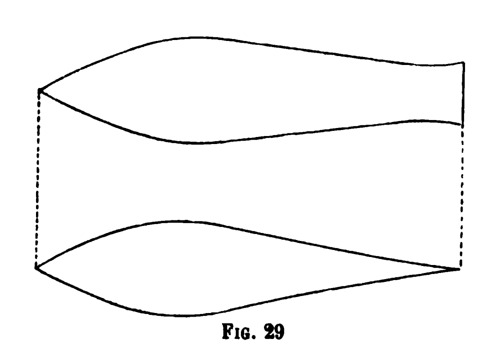


Fig. 29

Une semblable forme donnerait, pour une longueur et une force ascensionnelle déterminées, un maître couple beaucoup plus grand que la méridienne circulaire; elle demanderait des précautions spéciales afin que l'étoffe restât toujours parfaitement tendue; en outre, elle serait sans objet pour les ballons dirigeables, car on ne peut raisonnablement penser à imprimer à la poupe des mouvements latéraux analogues à ceux des poissons, alors que le gouvernail donne si simplement les changements de direction. Dans les

(1) En effet le poids des muscles pectoraux atteint en moyenne le 1/6 du poids total de l'oiseau; or le travail qu'un muscle peut produire est proportionnel à son poids.

applications de ce genre, la Mécanique ne doit pas chercher à copier la Nature, mais à rivaliser avec elle en mettant habilement en œuvre les procédés qui lui sont propres. C'est ainsi que la locomotion sur terre a été obtenue, non pas en réalisant un cheval automate, mais en transformant en mouvement de rotation le va-et-vient d'un piston mû par la vapeur. Il en est de même pour la locomotion aérienne : la sustentation résulte soit de la différence des densités entre l'air et l'hydrogène, soit de la réaction de l'air sur une surface convenablement inclinée ; la propulsion est due à l'hélice ; les changements de direction sont obtenus par un organe distinct, le gouvernail.

Mais s'il est absurde de vouloir imiter servilement la nature, il serait également ridicule de ne pas tenir compte des enseignements qu'elle nous donne. Nous luttons contre les difficultés qu'elle-même a rencontrées et, dans les inimitables procédés qu'elle emploie pour les vaincre, nous pouvons dégager parfois une indication dont il importe de profiter. Or les poissons ont le maître-couple plus rapproché de la tête que de la queue (1). Que cette circonstance ait pour but de diminuer la résistance ou de faciliter la manœuvre dans l'eau, nous devons supposer qu'elle est utile puisqu'on la retrouve chez *tous* les poissons. C'est la réponse qu'on peut faire à l'argument d'après lequel les remarques précédentes seraient sans valeur, sous prétexte que la Nature a moins recherché la perfection que la variété des espèces. Si par exemple il était avantageux que la proue fût longue et la poupe très courte, il serait étrange, en raison de cet argument lui-même, qu'au moins la moitié des espèces n'eût pas cette forme. Or, non seulement la poupe a une plus grande longueur que la proue, mais elle se termine par une ligne droite, ce qui augmente encore son développement. Il est à peu près certain que ce développement a pour but de permettre aux filets d'air assez fortement écartés par la proue de se resserrer sur la poupe et de la chasser en avant : la forme même de l'arrière, sa grande surface et son arête effilée semblent donner raison à cette hypothèse, que vient encore appuyer la notion du faible travail musculaire donné par les poissons. Et comme il convient de conserver au ballon la forme d'une surface de révolution terminée par deux pointes, on est conduit à exagérer le rapport entre la proue et la

(1) Je ne parle pas des oiseaux, chez lesquels on constate moins nettement ce fait à cause de leur voilure. Du reste, au point de vue de la résistance du fluide, c'est plutôt au poisson qu'il faut comparer le ballon dirigeable, mobile équilibré qui se déplace suivant son axe.

poupe afin d'obtenir avec cette dernière une surface suffisante pour bien récupérer le travail dépensé à l'avant.

Il serait intéressant de vérifier ces considérations et d'étudier les variations de la résistance non seulement en fonction de l'allongement, mais aussi en fonction du rapport de la proue à la poupe. Malheureusement le calcul a été jusqu'à présent rebelle, et les quelques expériences qu'on a faites sont très insuffisantes.

En 1872, M. Paul Dupré, fils d'Athanase Dupré, a fait mouvoir un disque dans de l'air chargé d'épaisses fumées que traversait un rayon de soleil : il dessina les filets obtenus, et constata qu'ils sont plus allongés à l'arrière du disque. Dans ces dernières années, des expériences remarquables ont été faites à l'usine Krupp par MM. Mach et Salcher pour photographier l'état de l'air traversé par des projectiles animés de grandes vitesses. Au moment où le projectile passait devant une lentille à long foyer *(fig. 30)*,

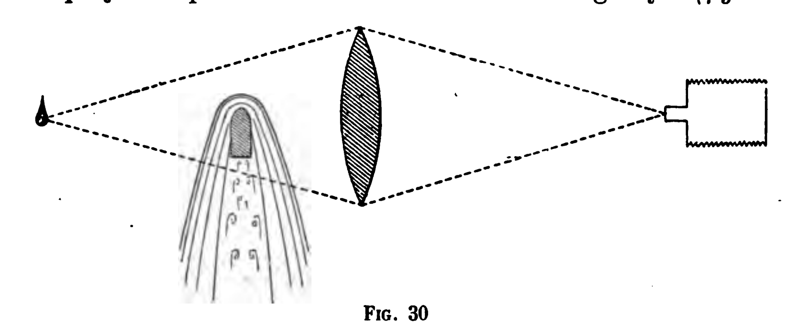


Fig. 30

il fermait un courant et une étincelle jaillissait. L'appareil photographique se trouvait au foyer conjugué de l'étincelle et prenait l'image du projectile. Grâce au changement de réfringence, l'image de l'air qui entourait le projectile se fixait aussi sur la plaque : on constata l'entraînement d'une masse d'air à contour parabolique, comprimée à l'avant et raréfiée dans le sillage du projectile, sillage où se produisaient de nombreux remous.

Le capitaine Faraud a trouvé par des expériences très simples, faites sur des corps en carton lestés à leur partie inférieure, qu'une proue ogivale semblable à celle de *la France* donne 0,238 comme coefficient de réduction; en appliquant à un élément de surface la formule de la résistance indiquée par le commandant Renard, puis en intégrant, on trouve 0,1005! Le coefficient de réduction d'une poupe en forme de coin ayant un demi-angle de 20° fut trouvé égal à 0,55.

Il convient de faire remarquer que la méridienne donnant la

résistance minimum doit assurer en même temps la stabilité de route et la facilité des manœuvres. S'il en était autrement, il faudrait la rejeter. Ainsi il serait très difficile d'évoluer avec le ballon de Chalais poupe en tête : la moindre variation du vent produirait des tête-à-queue; le gouvernail placé à la proue ne serait efficace que si on le mettait au moins à une longueur de nacelle de la pointe arrière, ce qui compliquerait et alourdirait la construction. Ce serait une faute que d'opérer ainsi, la résistance dùt-elle en être notablement réduite.

3. — Propulsion

La résistance à l'avancement du ballon *la France*, mesurée par des expériences directes, donna

$$R = 0{,}0215\ SV^2.$$

Or, le commandant Renard trouva pour le travail T sur l'arbre la formule

$$T = 0{,}0415\ SV^3.$$

Le rapport entre le travail de traction directe $0{,}0215\ SV^3$ et le travail sur l'arbre est donc très sensiblement $\frac{1}{2}$. On a le plus grand intérêt à augmenter ce rapport; or il dépend, d'une part des résistances interposées entre le moteur et le propulseur, d'autre part du propulseur lui-même. On peut diminuer les résistances intermédiaires en étudiant les transmissions et en donnant à l'arbre moteur et au propulseur des vitesses aussi peu différentes que possible. Quant au propulseur, il faut chercher à élever son rendement.

Le seul appareil que je considérerai ici est l'hélice ; c'est à elle qu'ont eu recours Giffard, Dupuy de Lôme, Tissandier, Renard et Krebs ; elle paraît constituer le meilleur et le plus simple des propulseurs destinés à agir sur un fluide dans lequel ils sont entièrement plongés.

S'il est impossible de trouver autre chose que des formules empiriques pour exprimer la résistance au déplacement d'un plan, quelles difficultés ne doit-on pas éprouver à établir la théorie mathématique de l'hélice ! Le calcul ne peut être employé que dans le but d'obtenir des formules approchées, applicables seulement dans les conditions où l'on a déterminé les coefficients numériques qu'elles contiennent. Mais il est impossible d'en tirer des déductions rigoureuses sur la forme, le pas, le tracé des bras, etc. Pour

se rendre compte de l'influence réelle de ces éléments, il est donc nécessaire d'avoir recours à des expériences habilement conduites, guidées par des conceptions théoriques contrôlées sans cesse sous des formes aussi variées que possible.

Mais la méthode expérimentale n'est pas sans difficultés; la petitesse des efforts à mesurer et la grandeur des résistances parasites introduites par les appareils rendent les mesures très délicates et demandent une grande ingéniosité dans les méthodes employées.

Expériences de Chalais. — Dans les expériences faites à Chalais pour mesurer la poussée à point fixe de l'hélice du ballon *la France*, le commandant Renard opéra de la façon suivante:

La nacelle était suspendue par un système équivalant à deux leviers égaux et parallèles AB, A'B', assez longs pour que l'appareil oscillât sans frottement appréciable (*fig. 31*). L'hélice, mise en marche par une dynamo, tirait la nacelle; pour ramener la ligne de foi FF en coïncidence avec le fil vertical du réticule d'une lunette fixe, il fallait mettre dans le plateau *p* un poids P qui mesurait la poussée.

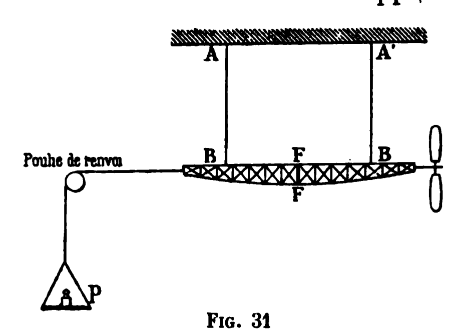


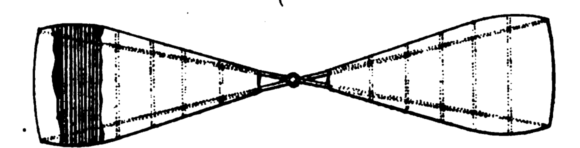
Fig. 31

On calculait, d'après les indications de l'ampère et du volt-mètre, le nombre de watts qui entraient dans la dynamo. Un tableau des mesures au frein dressé à la suite d'expériences préalables permettait de déterminer, d'après ce nombre de watts, le travail sur l'arbre du moteur et par suite sur l'arbre de l'hélice. Les nombres trouvés pour l'hélice de *la France*, qui est représentée par les figures 32, furent les suivants :

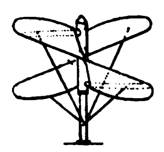
TRAVAIL SUR L'ARBRE de l'hélice T	NOMBRE DE TOURS par minute N	POUSSÉE P	$\frac{P}{T}$	$\frac{P}{T}N$	$\frac{P^3}{T^2}$
chx		*kg*			
27	17	8	0,296	5,04	0,70
70	24	15	0,214	5,14	0,69
150	32	26	0,173	5,53	0,78
242	35	35	0,145	5,08	0,73
364	40	47	0,129	5,17	0,78
617	48	64	0,104	5,00	0,69

Pour déduire de ces chiffres d'expériences les enseignements

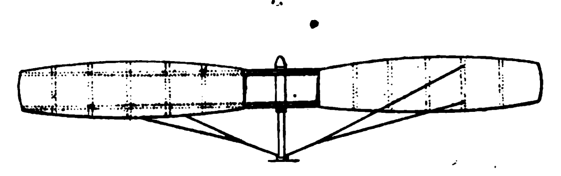
Echelle $\frac{1}{100}$.



Vue longitudinale suivant un plan perpendiculaire à l'axe



Vue par l'extrémité des ailes suivant un plan parallèle à l'axe.



Vue longitudinale suivant un plan parallèle à l'axe.

FIG. 32.

qu'ils comportent, imaginons que le travail T, au lieu d'être employé à faire tourner une hélice, donne un mouvement de va-et-vient de vitesse v à deux disques circulaires de surface s, et de façon que le disque qui va en sens contraire de la marche du dirigeable reçoive l'air normalement *(fig. 33)* et que le disque qui va dans le sens de la marche le reçoive par sa tranche : l'effet est identique à celui que produirait le recul continu d'une surface s. Or, si l'on admet que la résistance de l'air soit égale à Ksv^2, il en résulte une poussée



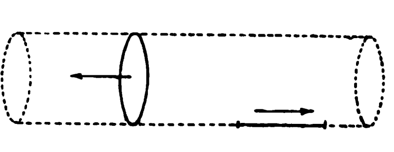


FIG. 33.

$$p = Ksv^2 ;$$

d'autre part

$$T = Ksv^3,$$

d'où

$$\frac{p^3}{T^2} = Ks.$$

Ainsi, la quantité $\frac{p^3}{T^2}$ est indépendante de v. Or, il en est précisément de même pour l'hélice, ainsi que le montre la dernière colonne du tableau précédent, où les valeurs observées peuvent être considérées comme constantes dans les limites des erreurs d'observation. On peut donc déterminer une surface s et une vitesse v telles que le mécanisme précédent donne, pour un travail déterminé T, la même poussée $p = P$ que l'hélice, et par conséquent lui soit équivalent. Si l'on pose $\frac{P^3}{T^2} = l$, il suffit pour cela que l'on ait

$$s = \frac{l}{K}, \quad v^2 = \frac{P}{l}.$$

Par suite, si l'on veut comparer la puissance de deux hélices H et H_1, quand on connaît les valeurs l et l_1 du rapport $\frac{P^3}{T^2}$, on peut calculer par les formules précédentes les surfaces figuratives s et s_1 ainsi que les vitesses v et v_1 : rien n'est alors plus facile que de voir laquelle des deux surfaces figuratives, et par conséquent laquelle des deux hélices, est supérieure à l'autre. Ce moyen de comparaison permet de rechercher la forme d'hélice la plus avantageuse pour l'allure qu'on veut donner au ballon.

Certains auteurs ont considéré le rapport $\frac{P}{T}$, c'est-à-dire l'effort par unité de travail, comme donnant en quelque sorte la mesure de la puissance de l'hélice. Aussi, quand le commandant Renard annonça que l'hélice de *la France*, marchant à 48 tours par minute, avait donné un effort de 64 *kg* pour une dépense de 617 *kgm*, soit 0,104 *kg* par kilogrammètre, on déclara ce propulseur détestable sous prétexte que d'autres plus petits avaient donné un rapport deux ou trois fois plus grand. Or il résulte de ce qui précède que le rapport $\frac{P}{T}$ varie en raison inverse de la vitesse et par suite du nombre de tours, ce que vérifie bien le tableau précédent où $\frac{P}{T}N$ est très sensiblement constant. Le rapport $\frac{P}{T}$, qui varie pour une même hélice proportionnellement au nombre de tours, ne peut donc en mesurer la puissance.

Au contraire, la connaissance du rapport $l = \frac{P^3}{T^2}$ peut servir à évaluer cette puissance. En effet, par suite de la possibilité d'assimiler l'hélice à un plan orthogonal, on peut écrire les équations suivantes :

$$\frac{P}{N^2} = c^{te} = a,$$

$$\frac{T}{N^3} = c^{te} = b,$$

$$\frac{a^3}{b^2} = l.$$

Il suffit donc de mesurer une fois pour toutes a et b pour avoir P, T et N quand on se donne arbitrairement une de ces trois quantités. Mais il importe que la détermination de a et de b soit faite en mesurant *simultanément* le travail, la vitesse et l'effort, ces mesures étant indépendantes des causes d'erreur introduites par les résistances accessoires du mécanisme.

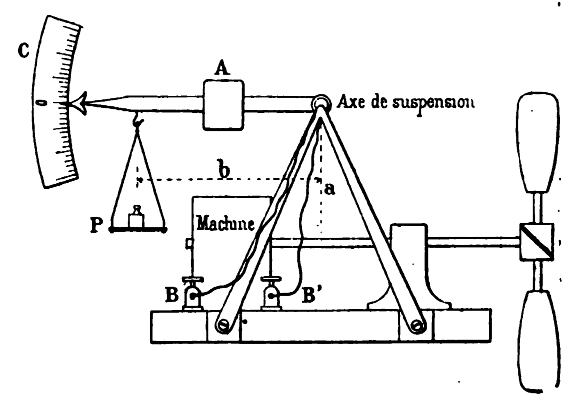


Fig. 34.

Telles sont les conditions qui ont guidé le commandant Renard dans la construction de la machine à essayer les hélices qu'il a inventée dans ces dernières années *(fig. 34)*. Voici comment le savant officier décrit cet appareil :

« Supposons d'abord, dit-il, qu'il s'agisse de mesurer l'effort. L'hélice et son moteur, qui sera constitué par une machine dynamo, seront installés sur un même bâti aussi léger que possible. Tout l'ensemble sera ensuite suspendu à un axe horizontal perpendiculaire à l'axe de l'hélice. Le courant arrivera au moteur par un fil très souple aboutissant à deux bornes BB'.

Au repos, la manœuvre d'un contrepoids A permettra d'amener l'extrémité d'une longue aiguille au zéro d'un cadran fixe C.

L'hélice étant ensuite mise en mouvement, l'effort de poussée rejettera tout l'appareil vers la gauche, et l'aiguille indiquera ce mouvement en s'écartant du zéro vers le haut de la graduation. On la ramènera au zéro en plaçant des poids dans le plateau P.

A cet instant il y aura équilibre entre la poussée et les poids additionnels, et, si l'on désigne par a la plus courte distance de l'axe de l'hélice à l'axe de suspension et par b le bras de levier du plateau par rapport à l'axe de suspension, on aura évidemment :

$$Pa = bm$$

m étant le poids placé dans le plateau, d'où :

$$P = \frac{bm}{a}.$$

En somme la poussée sera directement mesurée, sans que les frottements de l'axe de rotation sur ses coussinets interviennent en rien, et l'on aura un degré de précision tout à fait comparable à celui d'une balance, si l'on a soin de suspendre l'appareil à un axe portant, au lieu de tourillons, des couteaux d'acier trempé.

S'il s'agissait de mesurer le travail, on commencerait par mesurer le moment moteur M. Pour cela le même appareil serait suspendu à un axe horizontal, parallèle cette fois à l'axe de rotation et supérieur à cet axe. Le moment moteur est évidemment égal au moment des forces de réaction de l'air agissant sur les ailes de l'hélice et par conséquent sur tout le bâti. Dès que l'hélice sera mise en mouvement, ces forces de réaction tendront à faire tourner tout l'appareil en sens inverse, et il ne sera arrêté que par son moment de stabilité autour de son axe de suspension.

Si l'on ramène alors l'ensemble au zéro d'une graduation appropriée en plaçant un poids n dans un plateau spécial ayant un bras de levier b', on aura évidemment :

$$M = nb'.$$

Le travail sera connu quand on connaîtra la vitesse angulaire ω et l'on aura :

$$T = M\omega.$$

Pour que ces mesures soient simultanées, il suffit de suspendre simultanément le bâti aux deux axes précités, le premier que nous appellerons l'axe transversal, et le second l'axe longitudinal. On aura ainsi une suspension à la Cardan.

Le mouvement de l'hélice déterminera deux déviations simultanées que l'on annulera par des poids placés dans les deux plateaux. La vitesse sera mesurée au moyen d'un compteur de tours porté par le bâti et embrayé électriquement de façon à ne déterminer au moment de l'embrayage que des forces intérieures. On aura donc ainsi le moyen de mesurer simultanément : la poussée P, le moment M et la vitesse ω, ou le nombre N de tours par seconde.

Le travail sera donné par la formule :

$$T = M\omega = M \times 2\pi N \text{ (1).} »$$

Grâce à de nombreux essais faits avec cet appareil et à d'intéressantes considérations, d'une part sur la qualité de l'hélice ou rapport de la surface figurative s à la surface S décrite par les ailes, d'autre part sur la qualité des ailes ou rapport de s à leur surface, le commandant Renard a trouvé, paraît-il, une hélice de formes beaucoup plus avantageuses que celles de *la France ;* naturellement cette hélice conduira *le Général-Meusnier*.

Appareil de M. Langley. — Il serait très important que dans les expériences précédentes l'air se renouvelât au contact de l'hélice : tel n'est pas malheureusement le cas de l'appareil de Chalais.

En Amérique, un astronome distingué de Washington, M. Langley, correspondant de l'Institut, a construit une curieuse machine qui remplit cette condition ; cette machine *(fig. 35)* inscrit sur un

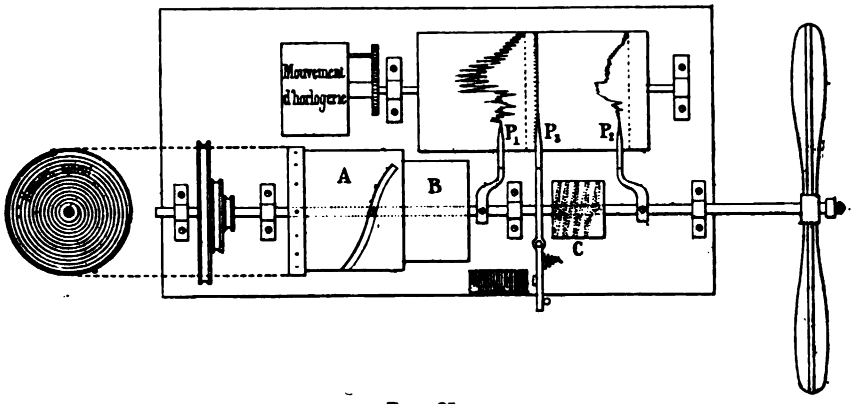


Fig. 35.

cylindre enregistreur à la fois la force propulsive de l'hélice et la puissance dépensée.

(1) La machine à essayer les hélices, par le commandant Renard. *(Revue de l'Aéronautique de 1889.)*

L'arbre est coupé en deux parties terminées chacune, du côté de la coupure, par deux cylindres A B mobiles l'un dans l'autre ; au premier est attachée l'extrémité extérieure d'un ressort spiral dont l'extrémité intérieure est fixée à la partie de l'arbre qui porte le cylindre B ; celui-ci est muni d'un curseur qui s'engage dans une rainure hélicoïdale creusée sur le cylindre A. Enfin, l'arbre a été coupé à l'intérieur d'un troisième cylindre C, de façon que les deux parties tournent ensemble et ne puissent se déplacer l'une par rapport à l'autre que suivant l'axe ; l'effort suivant l'axe est contre-balancé par l'action d'un ressort à boudin contenu dans le cylindre C.

Si on fait tourner, sous l'action d'une pédale par exemple, la partie de l'arbre opposée à l'hélice, le couple moteur se transmet à celle-ci par l'intermédiaire du ressort spiral et il en résulte, grâce au mouvement du curseur dans la rainure hélicoïdale, des déplacements du crayon P_1 qui s'enregistrent sur un cylindre tournant. Sous l'effort de la rotation, l'hélice avance ou recule suivant qu'il y a accélération ou ralentissement de la vitesse, et ses déplacements s'enregistrent par l'intermédiaire du crayon P_2. Un troisième crayon P_3 inscrit les battements d'une horloge. A l'aide de graduations empiriques préalables, on peut déduire de ces tracés la valeur de la force propulsive en fonction de la puissance dépensée.

Pour que l'air se renouvelle au contact de l'hélice, M. Langley avait installé son appareil sur le manège qui lui a servi à faire ses célèbres expériences d'Aérodynamique (1). Deux bras de 9,15 *m* de longueur se prolongeaient suivant un diamètre ; à l'extrémité de l'un d'eux on montait l'appareil précédent sur une balance spéciale au pied de laquelle se trouvait un électromoteur qui était actionné par une dynamo fixe, et donnait le mouvement à l'hélice.

Les conclusions de M. Langley ne sont pas très suggestives : « Tout d'abord, dit-il, l'efficacité est plus grande avec un petit nombre d'ailes. Le cas de l'hélice propulsive est, en effet, tout différent de celui d'un moulin à vent ; ces appareils ne sont pas réciproques et il faudrait plutôt comparer ce dernier à l'hélice du ventilateur. Pour le moulin à vent, la pratique et la théorie

(1) Ces expériences ont été exécutées de 1888 à 1891 avec un soin remarquable. Le mémoire où elles sont décrites, présenté en 1891 par M. Berthelot à l'Académie des Sciences, obtint l'honneur d'être imprimé en entier. Il offre cependant prise à de sérieuses critiques et ses assertions en ce qui concerne l'Aviation sont beaucoup trop optimistes. Au reste, la plupart des lois que M. Langley croyait avoir découvertes se trouvent dans les travaux de Borda, Dupré, Pénaud, etc., — ce que probablement l'Académie ignorait.

montrent qu'il y a avantage à ce que les ailes couvrent la totalité du cercle circonscrit ; pour l'hélice propulsive, si les ailes sont nombreuses, chacune frappe de l'air déjà frappé par les précédentes, de l'air ayant déjà cédé sous leur pression et n'offrant plus la même résistance que celui qui n'a pas encore été agité. — En outre, plus grande est la vitesse d'avancement, plus faible est le recul et plus forte est l'efficacité de l'hélice. » Ces considérations n'ont certes pas la précision de celles que j'ai développées plus haut.

Bref, l'expérience et la théorie laissent beaucoup de points obscurs dans cette délicate question des carènes et des hélices aériennes. C'est peut-être avec le dirigeable lui-même qu'on réussira à éclairer ces points obscurs : en effet, le navire aérien place l'observateur au sein d'une immense masse d'air animée d'un mouvement rectiligne de vitesse et de direction connues ; il se prête donc parfaitement à ce genre de recherches.

TROISIÈME PARTIE

1. — Les moteurs légers.

La question des moteurs légers est si complexe, elle est susceptible de solutions si differentes, que son étude détaillée sort des limites de mon programme ; au surplus, je devrais me récuser pour incompétence. Je me bornerai donc à des considérations générales, étayées autant que possible sur des chiffres que l'expérience a consacrés.

Il est impossible de donner des règles précises pour obtenir l'allégement de la machinerie proprement dite. L'étude de l'agencement des diverses parties; la suppression de toutes les pièces inutiles et l'emploi pour les autres du métal qui travaille le mieux, à égalité de poids, en vue de l'effort à supporter ; le choix des formes, solides d'égale résistance, évidements, etc...; le soin d'éviter les chocs, d'équilibrer les organes animés de mouvements rapides et enfin de confier, quand cela se peut, plusieurs fonctions à une même pièce : tels sont, rapidement énumérés, les principaux moyens de réaliser la légèreté de la machinerie. On fonde de grandes espérances sur l'emploi de l'acier au nickel dans la construction des pièces actives ; pour les bâtis, on pourra substituer à la fonte et à l'acier coulé soit des tôles d'acier assemblées et renforcées suivant la gradation des résistances, comme on l'a fait à bord de certains torpilleurs, soit le bronze d'aluminium, comme font MM. Escher, Wyss et Cie pour leurs nouveaux moteurs à explosion. Quant à l'emploi de l'aluminium seul ou à l'état d'alliage pour la construction des organes mêmes de la machine, on n'y peut guère songer, pour le moment du moins. Je crois savoir qu'à Chalais-Meudon, aux essais du nouveau moteur, on a dû remplacer la plupart des pièces où cette application avait été tentée.

Mais la légèreté s'obtiendra surtout par le choix judicieux des agents destinés à tranformer l'énergie en travail mécanique. C'est à cette question, de beaucoup la plus intéressante, que je consacrerai cette troisième Partie. Je commence par la comparaison entre les machines à vapeur et les moteurs électriques.

1.—COMPARAISON ENTRE LA MACHINE A VAPEUR ET LE MOTEUR ÉLECTRIQUE

Les seuls moteurs employés jusqu'ici dans la navigation aérienne sont les machines à vapeur et les dynamos actionnées par des piles. Aux premiers on a reproché le délestage continu dû à la combustion et les dangers que présente un foyer placé au-dessous d'un énorme réservoir d'hydrogène assez mal fermé ; aux seconds, qui n'ont pas ces défauts, on reproche le poids de la pile. Je ne m'occuperai pas du danger d'incendie, qui n'a pas arrêté Giffard, et qu'il est facile de conjurer, mais je vais rechercher quels sont, au point de vue de la légèreté, les avantages d'un système sur l'autre.

Moteur proprement dit. — Considérons d'abord le moteur.

La construction des dynamos a fait depuis quelques années beaucoup de progrès, et l'on obtient aujourd'hui une grande puissance avec un poids de métal relativement minime. Les moteurs Rechniewsky de 5 *chx* pèsent environ 65 *kg* par cheval, et ce poids, qui diminue avec la force des machines, s'abaisse à 45 *kg* pour les moteurs de 20 à 30 *chx*. Les dynamos multiplex Sautter-Lemonnier de 40 à 60 *chx* ont un poids de 35 *kg* environ

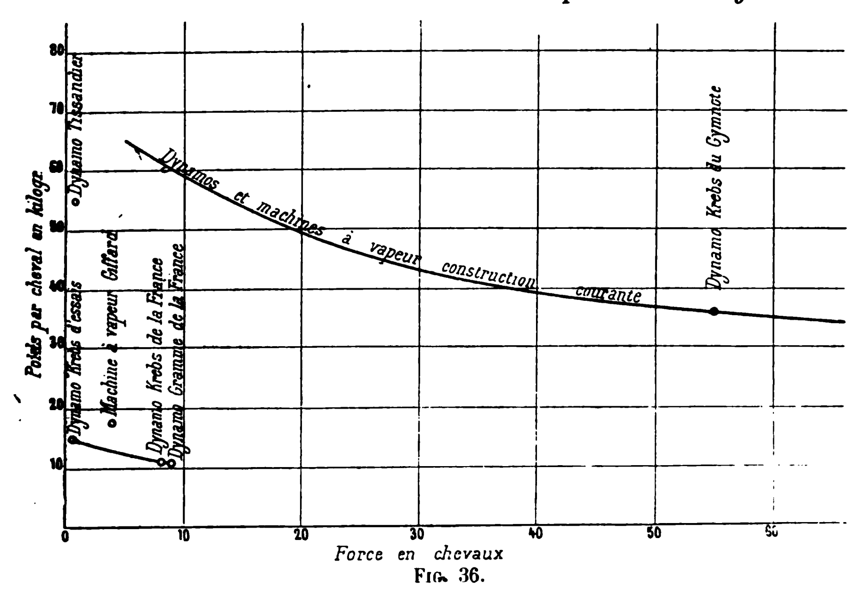


FIG. 36.

par cheval, poids qui descend rapidement à 30 quand la force augmente. Toutefois, cette diminution du poids en raison inverse de la force tend assez vite vers une limite, et si l'on représente graphiquement le poids par cheval en fraction de la puissance,

on obtient, pour les dynamos considérées qui sont d'une construction courante, la courbe figurée en 36. Le moteur qui a servi dans les expériences du bateau sous-marin *le Gymnote*, et qui est dû au commandant Krebs, se trouve sensiblement sur cette courbe ; il avait en effet une force de 55 *chx* et pesait 36,3 *kg* par cheval.

Si l'on veut appliquer les dynamos à la direction des aérostats, il est clair qu'on cherchera à obtenir des poids encore moindres. La dynamo de 1,33 *ch* employée par M. Tissandier et qui pesait 55 *kg* par cheval, ne réalisait qu'une faible économie. Mais la dynamo Krebs de 50 *kgm* qui fit fonctionner un petit dirigeable de 60 m^3 pour essais avant le ballon de 1884, pesait 10 *kg*, soit 15 *kg* par cheval. La dynamo Krebs de *la France* avait une puissance de 8,5 *chx* et son poids par cheval était de 11,5 *kg;* enfin, la dynamo Gramme de 9 *chx* qui la remplaça réduisit ce poids à 11 *kg*, mais il fallut donner à l'anneau l'énorme vitesse de 3 600 tours par minute, ce qui nécessita des précautions multiples pour empêcher les axes de s'échauffer et demanda de nombreuses améliorations dans la transmission et le mode de graissage.

Voyons maintenant quels sont les poids des machines à vapeur sans leur chaudière et sans leur approvisionnement en eau et en combustible.

Les moteurs légers de construction courante semblent avoir à peu près les mêmes poids que les dynamos. Les moteurs de 1 000 *chx* qu'on emploie à bord des torpilleurs pèsent une vingtaine de kilogrammes par cheval *indiqué;* dans ses derniers torpilleurs, M. Normand a même réduit ce poids à 17 *kg* environ. Le poids du cheval *sur l'arbre* est donc sensiblement sur le prolongement de la courbe obtenue pour les dynamos légères de construction courante. Dans les machines à condensation, ce poids est d'autant plus faible que la condensation est plus active.

Si l'on construit un moteur spécialement en vue de la navigation aérienne, on peut obtenir des réductions comparables à celles que réalisèrent MM. Gramme et Krebs sur les dynamos. Ainsi Giffard obtint 16,7 *kg* par cheval pour 3 *chx* sur l'arbre. Du reste, une différence de 2 à 3 *kg* par cheval ne serait sensible que pour un voyage de faible durée ; elle deviendrait insignifiante pour un voyage de 10 heures, puisqu'elle n'entrerait que pour 0,2 à 0,3 dans le poids du cheval-heure.

Si donc il y a une supériorité marquée d'un système sur l'autre, cette supériorité est due au générateur.

Générateur. — Dégageons tout d'abord les différences, au point de vue qui nous occupe, entre la chaudière et la pile. A cet effet, considérons-les comme le siège d'une combustion produisant des calories qu'un agent transporte au moteur pour les y transformer en travail mécanique ; cet agent sera la vapeur d'eau dans un cas, et, dans l'autre, le courant impondérable qui va des pôles de la pile aux bornes d'entrée de la dynamo. Tandis qu'il est d'un poids nul pour la pile, il constitue pour la chaudière un impedimentum considérable. En effet, si l'on opère sans condensation, il faut une provision d'eau proportionnelle à la durée. Si l'on condense la vapeur, il faut soit un poids d'eau froide également proportionnel à la durée pour produire la condensation, soit un condenseur à surface toujours très lourd et dont l'emploi ne peut être avantageux que s'il est appelé à fonctionner longtemps. Par contre, la mise en œuvre de l'agent de transport nécessite dans la pile un poids de liquide et de sels qui devient considérable si la marche est longue, tandis qu'avec les machines à vapeur le poids du combustible n'est pas aussi grand et que le poids du comburant est nul, puisqu'il est constitué par l'air lui-même.

La durée possible du voyage est donc un facteur important de la comparaison que je cherche à établir. Pour bien nous fixer, voyons quelles sont les valeurs du cheval-heure aux différentes durées.

MM. Tissandier emportèrent 24 éléments de 7 à 8 *kg*, plus une certaine provision de liquide de façon à pouvoir prolonger l'action du moteur pendant 2 heures et demie ; le poids total était de 225 *kg*, et la force de 1 1/3 *ch*, ce qui met, pendant cette durée, le poids moyen du cheval-heure à 68 *kg*. Ce poids varierait peu si l'on emportait des approvisionnements pour une durée plus grande, car les vases, qui sont en ébonite et par suite très légers, ne devaient pas peser plus du 1/10e du poids total de la pile ; de sorte que le poids du cheval-heure tend vers 9/10e 68 = 61 *kg* quand la durée augmente. C'est ce que représente la courbe figurative du graphique 37.

MM. Renard et Krebs emportèrent 400 *kg* de piles pour fournir, sans renouvellement de liquide, 9 *ch* pendant 1 heure trois quarts, ce qui met le cheval-heure à 25 *kg* en moyenne pendant cette durée. En admettant encore, ce qui s'accorde assez bien avec ce que l'on sait sur la capacité électrique de la liqueur employée, que le poids du liquide et des électrodes fût les 9/10e du poids total, on obtient 9/10 25 = 22,5 *kg* aux très grandes durées.

Examinons maintenant les générateurs des machines à vapeur.

Le générateur construit en 1852 par Giffard pesait 100 *kg ;* il consommait par heure environ 60 *kg* d'eau et de combustible et donnait 3 *ch* sur l'arbre, ce qui met le poids moyen du cheval à 53 *kg* pour la première heure.

Quelques années plus tard, M. Louis du Temple, capitaine de frégate, inventa un moteur léger destiné à réaliser la navigation aérienne avec un appareil plus lourd que l'air que son frère avait imaginé. Cet essai eut le sort malheureux de tous ceux qu'on a tentés dans cette voie ; mais la chaudière du Temple, basée sur la séparation complète des courants ascendants et descendants, avait des qualités si remarquables au point de vue de la légèreté et de l'utilisation du combustible qu'on l'adopta pour les torpilleurs, où ces conditions sont essentielles ; l'avenir lui réserve peut-être de reprendre sa destination primitive.

La chaudière qui figurait à l'Exposition de 1878 pesait 300 *kg*, et donnait avec un tirage ordinaire 140 *kg* de vapeur à 5 atmosphères par heure ; ce type et quelques autres me conduisent à admettre, pour les chaudières qu'on pourrait placer à bord d'un navire aérien, 1 *kg* de vapeur pour 2 *kg* de chaudière. Quant à la consommation de charbon, M. Normand l'a réduite dans ses derniers torpilleurs à moins de 0,500 *kg* par cheval *indiqué;* il est vrai que le moteur absorbait seulement 4,500 *kg* de vapeur pour développer ce cheval, de sorte qu'on doit évaluer la dépense de charbon des chaudières employées à un peu plus de 0,100 *kg* par kilogramme de vapeur. Étant donné que le moteur d'un ballon dirigeable doit satisfaire à des exigences spéciales, j'admettrai que la chaudière dépense 0,120 *kg* de charbon par kilogramme de vapeur, et qu'il faut 15 *kg* de vapeur pour donner un cheval sur l'arbre dans les moteurs sans condensation. Avec ces données moyennes, on voit qu'à 1/15 de cheval sur l'arbre correspondent 1 *kg* de vapeur, 2 *kg* de chaudière, et 0,120 *kg* de charbon, en tout 3,120 *kg*, ce qui met le poids du générateur à 46,8 *kg* par cheval-heure. C'est presque le double du poids obtenu avec la pile Renard *(fig. 37)*.

Mais le résultat change si l'on s'impose une durée plus en rapport avec les besoins de la pratique, 10 heures par exemple ; en effet, le poids de la chaudière se répartit sur cette durée, de sorte qu'à 1/15 de cheval correspond un poids de $1 + 0,2 + 0,12 = 1,32$ *kg*, ce qui met le poids du générateur à 19,8 *kg* par cheval-heure. Remarquons toutefois que cette diminution s'enraie très



rapidement, et que le poids du cheval-heure tend vers une limite

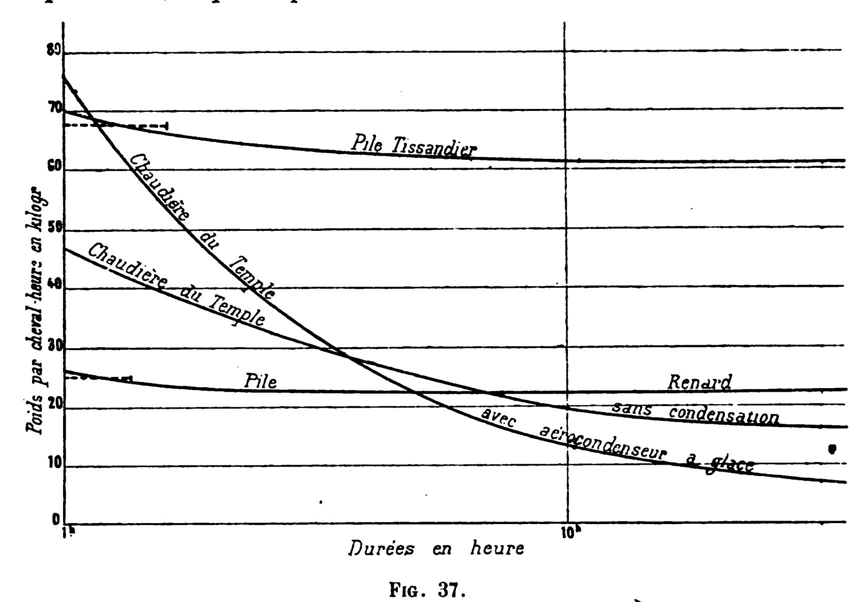


Fig. 37.

qui est, dans le cas présent, de $1{,}12 \times 15 = 16{,}8$ *kg;* la courbe représentative est donc asymptote à la droite 16,8.

Ces résultats seraient encore exagérés si l'on pouvait employer des machines à condensation. Malheureusement les condenseurs actuels exigent eux-mêmes une très grande quantité d'eau. Si l'on demande à l'air ambiant, constamment renouvelé par la marche du ballon, de condenser la vapeur, on est conduit à prendre des surfaces très vastes, par suite encombrantes et lourdes. C'est précisément à l'homme qui, le premier, voulut appliquer la machine à vapeur à la navigation aérienne, c'est à Giffard que revient l'idée de l'aérocondenseur. Cet appareil, formé d'une série de tuyaux méplats à large surface, fut expérimenté dans les ateliers que M. Flaud venait de fonder, mais ne servit dans aucun voyage aérien. Le ballon que M. Yon, élève de Giffard, a construit pour la Russie possède un appareil semblable, présentant une surface équivalant à 55 m^2 ; aux essais, on reconnut que la condensation était absolument insuffisante. Dans un nouveau projet de dirigeable qu'il a en portefeuille, M. Yon prévoit un aérocondenseur système Foucher, caractérisé par la légèreté de ses tubes et par l'adjonction d'un ventilateur ; cet appareil aurait une surface équivalant à 125 m^2 et pèserait 440 *kg*, soit environ le poids de la chaudière sans eau ; il ne donnerait qu'un vide relatif de 150 *mm*

de mercure. Pour augmenter le degré du vide, M. Derval (1), Ingénieur des arts et manufactures, a décrit un appareil dans lequel un réservoir contenant de la glace condense la vapeur qui a résisté à l'action des tubes; mais cet aérocondenseur n'a pas encore prouvé sous quel poids il est efficace. J'insiste sur cette question en raison de son importance, et j'ajoute qu'un condenseur léger donnerait des progrès d'autant plus sensibles qu'en permettant d'augmenter la vitesse de marche il augmenterait sa propre efficacité.

Voyons quel changement la condensation apporterait dans le poids du cheval-heure. Supposons qu'on adjoigne aux chaudières du Temple que nous avons considérées un aérocondenseur à glace qui pèse le double de la chaudière et consomme par heure un poids de glace égal à la moitié du poids de la valeur produite : ce sont là des conditions peu avantageuses, qui donnent aux faibles durées un poids très grand par cheval-heure, mais qui procurent une économie notable dans un dirigeable étudié en vue d'un voyage un peu long. En effet, on peut compter, en raison du vide obtenu, que le kilogramme de vapeur donnerait 1/10 de cheval sur l'arbre. M. Normand a même obtenu 1/6 dans ses derniers torpilleurs, mais il faut dire que le vide se faisait à 0,15 *kg*. Donc à 1/10 de cheval correspondent : pour 1 heure 1 *kg* de vapeur + 2 *kg* de chaudière + 0,12 *kg* de charbon + 4 *kg* d'aérocondenseur + 0,5 *kg* de glace, en tout 7,62 *kg*, soit 76,2 *kg* par cheval-heure; et pour 10 heures 0,1 + 0,2 + 0,12 + 0,4 + 0,5 = 1,32 *kg*, soit 13,2 *kg* par cheval-heure. La courbe représentative est asymptote à la droite à 0,62 × 10 = 6,20 *(fig. 37)*.

Bien entendu, les deux graphiques précédents n'ont pour but que de représenter l'allure générale des phénomènes.

Conclusion. — Nous pouvons maintenant conclure. Les dynamos présentent de grands avantages quand il s'agit de réaliser la direction pendant un temps relativement court, 1 heure et demie à 2 heures, mais elles sont dépassées par les machines à vapeur quand il s'agit d'évoluer pendant une journée, but vers lequel doit tendre la navigation aérienne.

Le moteur Tissandier pesait, tout compris, 150 *kg* par cheval sur l'arbre, et le moteur de Chalais 75 *kg*. M. Yon prétend réduire ce dernier poids du tiers, en employant une chaudière très légère du système de Dion-Bouton-Trépardoux et un aérocondenseur Foucher. M. Maxim, l'électricien bien connu, a construit récem-

(1) E. Derval. — *Etude sur la navigation aérienne.*

ment un aéroplane (qui du reste ne fonctionne pas mieux que les autres appareils de ce genre, en raison des difficultés qu'on éprouve à obtenir la stabilité), et cet aéroplane possède une machine à vapeur des plus remarquables dans laquelle le poids serait moindre que dans les moteurs précédents ; l'aérocondenseur est formé par l'aéroplane même. La *Revue de l'Aéronautique* publiera prochainement la description complète de cette machine.

On a reproché aux officiers de Meudon d'avoir suivi la voie indiquée par MM. Tissandier en adoptant le moteur électrique pour leurs expériences de 1884 et 1885. Vous voyez, Messieurs, que ce reproche n'est pas fondé. Quel était, en effet, l'état du problème à l'époque où ces savants le reprirent? Giffard, Dupuy de Lôme, Tissandier avaient échoué faute d'une vitesse propre suffisante. Il fallait donc augmenter cette vitesse, la doubler, c'est-à-dire réaliser un moteur pesant huit fois moins que les moteurs les plus légers construits jusqu'alors. Cette condition était assez draconienne pour qu'on dût se contenter d'une durée de marche relativement faible. Qu'importait, du reste, une courte durée? L'indispensable, c'était de prouver la direction en se dirigeant, comme le philosophe de l'antiquité prouvait le mouvement en marchant; c'était de frapper le public, indifférent et sceptique, par une brillante démonstration ; c'était aussi de montrer à l'État que les crédits ouverts n'avaient pas été dépensés en pure perte, et que le problème, entré dans une voie nouvelle, devenait digne de toute sa sollicitude. Dans ces conditions, le moteur électrique s'imposait, et il faut autant féliciter MM. Renard et Krebs de l'avoir choisi pour leurs premières expériences que de l'avoir abandonné depuis.

La machine à vapeur conservera sa supériorité. — Ainsi donc, telle qu'elle est, la machine à vapeur est supérieure au moteur électrique quand il s'agit d'obtenir la navigation aérienne pendant plus d'une demi-journée. Cette supériorité se conservera-t-elle? C'est ce que je vais rechercher.

On pourra évidemment réduire encore le poids des dynamos, mais il semble difficile d'obtenir des piles beaucoup plus légères que celles du commandant Renard, non qu'il soit impossible de faire mieux, mais parce que le progrès est forcément très lent quand on est parvenu à un certain degré de perfection. Il n'y a même pas à compter sur les accumulateurs qui ont donné à une certaine époque les plus grandes espérances et dont le commandant Renard s'occupa avant d'étudier les piles ; les plus légers, le Faure-Sellon-Volckmar et le Laurent Cély, pèsent trois fois plus

que la pile Renard. On pourrait sans doute diminuer ces poids en prenant une base autre que le plomb, mais je crois difficile d'obtenir avec 1 *kg* de plaque le travail que peut développer 1 *kg* des produits chimiques qui composent une bonne pile ; de même en effet qu'il faudrait comprimer 1 *kg* d'air à plusieurs milliers d'atmosphères pour obtenir le travail équivalent aux 8 000 calories que donne la combustion de 1 *kg* de coke, de même il faudrait probablement emmagasiner l'énergie électrique à une énorme tension pour que 1 *kg* de plaque pût produire le travail de 1 *kg* des éléments d'une pile. On ne doit donc pas s'attendre à ce que le cheval électrique devienne prochainement très léger, et je crois que la machine à vapeur conservera d'autant mieux sa supériorité qu'elle-même est susceptible de perfectionnements importants dont je vais dire quelques mots.

Dans le moteur proprement dit, il y aurait lieu de rechercher un dispositif donnant directement le mouvement de rotation, au lieu du mouvement de va-et-vient du piston. Un appareil dont la création remonte à près d'un demi-siècle. mais qui n'a été rendu pratique que dans ces dernières années, semble à première vue réaliser cette condition avec une grande économie de poids : je veux parler du turbo-moteur. Malheureusement, son principe même suppose des vitesses considérables auxquelles est due précisément son excessive légèreté. Ces vitesses peuvent convenir dans certains cas, par exemple pour obtenir la lumière électrique, mais il semble qu'elles sont un obstacle à l'emploi du turbo-moteur pour la navigation aérienne, du moins au point où elle en est. En prenant les moins grandes vitesses, 5 à 6 000 tours par minute, on voit qu'il faudrait encore, pour arriver aux vitesses des hélices actuelles, des engrenages qui absorberaient tous les avantages de ces moteurs.

C'est donc au générateur surtout qu'il faut demander l'allégement. Remarquons tout d'abord que le poids par cheval de la chaudière vide diminue, comme celui du moteur, quand la puissance augmente ; au contraire, le poids par cheval de la pile non chargée reste à peu près constant, puisque le nombre des éléments est sensiblement proportionnel à la puissance : c'est un avantage en faveur de la machine à vapeur qui s'affirmera de plus en plus avec les moteurs de puissance toujours croissante qu'emploieront les ballons dirigeables. Quant aux autres perfectionnements, le plus important résultera, à mon avis, de la découverte d'un condenseur léger.

Dans cet ordre d'idées, la recherche de dispositifs propres à augmenter le pouvoir réfrigérant par unité de poids du condenseur n'est pas suffisante ; il faut en même temps se préoccuper de diminuer le nombre de calories à enlever à la vapeur. Le moyen est simple, puisqu'il suffit de remplacer l'eau par des liquides dont la vapeur ait une grande pression et se produise à des températures relativement faibles. On réaliserait ainsi une économie à la fois sur le poids du condenseur, sur celui du charbon, et même sur celui du générateur, car il est évident qu'avec de pareils liquides il n'y aura plus besoin d'aussi lourdes chaudières. De nombreux liquides conviennent, et s'ils n'ont pas depuis longtemps remplacé l'eau, c'est que celle-ci se trouve partout et pour rien : mais, dans le problème qui nous occupe, les considérations de prix sont tout à fait secondaires ; quand on aura réussi, on verra à diminuer le prix de revient. Parmi ces liquides, je citerai le chloroforme, l'éther sulfurique, le sulfure de carbone qui se vaporisent aux environs de 50°, et certains produits de la famille du pétrole, comme le naphte et la gazoline, qui se vaporisent à des températures encore moindres.

Messieurs, l'emploi de moteurs conçus dans ces conditions s'est présenté plusieurs fois à votre examen depuis quelques années ; je n'insisterai donc pas. En particulier toutes les fois où la légèreté s'est imposée, vous avez été amenés à vous préoccuper de ces moteurs, qui du reste ne sont pas précisément nouveaux ; c'est ainsi que l'an dernier, M. Gaudry (1), dans sa très intéressante Communication sur la navigation à grande vitesse, vous rappelait les remarquables essais de Lafont et du Trembley avec des vapeurs combinées et préconisait l'emploi, non plus de l'éther sulfurique, mais de l'éther chlorhydrique qui donne à 20° une vapeur ayant une pression de près de 2 *kg* par centimètre carré et de 13 *kg* à 100°.

Non seulement il y a des progrès considérables à attendre de l'emploi de ces liquides pour transformer en travail mécanique à un poids très réduit les calories dégagées par le combustible, mais il y a aussi des perfectionnements à espérer de ce combustible lui-même. On prend d'ordinaire le coke parce que c'est, de tous les combustibles riches en calories, celui qui coûte le

(1) Dans un mémoire sur l'Aérostation militaire qui date de mars 1890, j'avais développé la plupart de ces considérations sur les perfectionnements des machines à vapeur, considérations que M. Gaudry devait plus tard exposer devant vous. Je ne suis pas surpris de cette coïncidence, la navigation aérienne et la navigation maritime à grande vitesse comportant l'une et l'autre l'allégement des moteurs actuels. Je ne puis que me féliciter d'être en communion d'idées avec notre distingué collègue.

moins cher; mais de même qu'il faut abandonner l'eau comme agent de transport, il convient, quoique l'intérêt soit moins grand, de substituer au coke, dont la puissance calorifique n'atteint pas 8000 calories, certains produits de la famille du pétrole dont la puissance calorifique dépasse 10 000. Avec eux le foyer, réduit à des brûleurs ou à une sorte de rampe, diminue et de poids et de volume ; la manutention se simplifie; la surveillance devient presque nulle; les dangers dus aux escarbilles, toujours à redouter avec l'énorme masse gazeuse qui surplombe le foyer, disparaissent.

Les combustibles gazeux sont encore plus riches que les combustibles liquides, mais on ne peut songer à les emporter dans des réservoirs qui absorberaient, et au delà, l'économie de poids qu'on se propose. Il faut, si l'on veut s'en servir, prendre le propre gaz du ballon. Mais ce mode d'alimentation du foyer offre de graves inconvénients, en raison de la diminution croissante de la force ascensionnelle et des dangers qu'il y a à relier le foyer et l'aérostat.

Les dangers peuvent être écartés par des dispositifs convenables; mais la diminution de la force ascensionnelle ne peut être évitée. Aussi Giffard, qui se proposait d'avoir recours à ce procédé dans la grande expérience qu'il projetait et que la maladie l'empêcha de réaliser, imagina-t-il d'atténuer les effets de cette déperdition en employant simultanément deux chaudières, l'une alimentée par du pétrole, et l'autre par le gaz du ballon. La perte de force ascensionnelle était ainsi compensée en partie par le délestage dû à la combustion. L'idée de Giffard, au point de vue de l'économie qui l'a fait naître, n'est pas sans analogie avec celle que Lafont et du Trembley mirent en pratique vers la même époque; dans ce dernier système, en effet, on se sert de la chaleur dégagée par la condensation pour vaporiser du chloroforme, de l'éther sulfurique ou du sulfure de carbone, et pour actionner avec la vapeur de ces liquides une machine de même force que la machine à vapeur d'eau. Mais tandis que Giffard n'exécuta pas son projet, les vapeurs combinées furent appliquées avec un grand succès. « Dans la traversée de Marseille à Constantinople, dit M. Gaudry, on ne faisait qu'une seule addition partielle au vaporisateur pour réparer les pertes inévitables. » Le poids du générateur et du combustible était donc réduit de moitié.

Pour diminuer le nombre des réservoirs et faciliter la tâche de l'unique mécanicien que possède généralement un ballon diri-

geable, on pourra employer le même corps à la fois comme combustible et comme agent de transport, ainsi que l'ont fait MM. Escher Wyss et Cie pour leur canots légers actionnés par des machines à vapeur de naphte : ces machines, dont le bâti est en bronze d'aluminium, ne pèsent que 60 *kg* par cheval, chaudière comprise, quand on dépasse 10 *chx;* la consommation de naphte est alors de 0,500 *kg* environ ; mais il y aurait lieu, pour la navigation aérienne, de tenir compte du condenseur, qui serait d'ailleurs beaucoup plus léger que pour une machine à vapeur d'eau.

2. — Moteurs aérothermiques et à hydrocarbures.

De même qu'il y a intérêt à remplacer l'eau par un liquide qui se vaporise plus facilement, de même il semble qu'il peut être avantageux de remplacer celui-ci par un liquide tout vaporisé, par un gaz. Et comme il serait trop lourd d'emporter des gaz comprimés, nous sommes conduits soit à prendre l'air ambiant, tel qu'il est, pour tranformer la chaleur de la combustion en travail mécanique, soit à donner à cet air des propriétés explosives pour recueillir sous forme de travail la force vive qui résulte de la déflagration. Nous avons ainsi deux types de machines, les moteurs aérothermiques et les moteurs à explosion ou à hydrocarbures. Ces moteurs ont l'un un réchauffeur peu encombrant, l'autre un simple brûleur ; l'inconvénient des lourdes chaudières est donc supprimé du même coup.

Moteurs aérothermiques. — Dans les moteurs aérothermiques, c'est l'air lui-même qui sert d'agent entre le foyer et le piston. Depuis longtemps on a pensé à ce genre de machines, en dehors de toute idée d'application à la direction des ballons ; mais on s'aperçut qu'il leur fallait des dimensions colossales. Dans sa *Théorie mécanique de la chaleur*, Zeuner en indique clairement et la cause et le remède : « Pour que les machines à air d'une grande force n'exigent pas des dimensions énormes, écrit-il, il n'y a qu'un moyen : il faut donner à la pression initiale la plus grande valeur possible. Je conclus de là qu'aucune machine à feu qui commence son cycle avec de l'air à la pression atmosphérique, *n'a d'avenir*, et que de telles machines ne remplaceront jamais la machine à vapeur lorsqu'il s'agira de développer de grandes forces. Les personnes qui s'occupent du perfectionnement des machines à feu doivent donc uniquement s'attacher aux machines fermées, dans lesquelles agit toujours la même quantité d'air qu'il faudra comprimer avant de mettre la machine en marche. » Tels sont les conseils de ce

grand maître de la Thermodynamique. Non seulement la compression préalable aura pour avantage de réduire le volume et par suite le poids du réchauffeur, mais encore elle rendra plus rapide la transmission de la chaleur dans la masse d'air, surtout si l'on force celle-ci à venir lécher les parois du foyer, auxquelles on évitera par cela même l'échauffement qui les détériore si vite. Il y aura intérêt à employer des combustibles liquides qui ont un grand pouvoir calorifique et n'encrassent pas les appareils.

Ainsi compris, le moteur aérothermique se compose donc essentiellement d'une pompe à air mue par la machine elle-même, d'un réservoir à air comprimé, d'un réchauffeur et d'un cylindre moteur, le tout complété par le dispositif de mise en marche.

Une des premières machines de ce genre est la machine Belou. En 1862, M. Mazeline, du Havre, en construisit une de 120 *chx* qui fut l'objet d'un rapport favorable de MM. Tresca et Alcan : la chaudière, qui consommait 1,46 *kg* de charbon, échauffait de l'air comprimé adiabatiquement à 1,94 *kg*. Parmi les défauts de cette machine, je retiens la faiblesse de la pression initiale, qui ne permit pas de réduire les dimensions à des proportions convenables; l'emploi du charbon, qui produisait une épaisse fumée, encrassant le tiroir et le cylindre; la perte dans l'atmosphère d'air à 257°, contenant encore une quantité notable d'énergie; enfin et surtout l'emploi de la compression adiabatique.

Nous avons été conduits, en effet, à nous occuper des machines à air parce que, dans les machines à vapeur, une trop grande partie de l'énergie qui résulte de la combustion est employée à l'échauffement du liquide avant sa transformation en vapeur. Or, n'est-ce pas un peu cela que nous faisons avec la compression adiabatique, dans laquelle une partie du travail destiné à la compression sert à l'échauffement de la masse d'air? Cette considération n'avait pas échappé à Zeuner, et lui paraissait un des vices rédhibitoires de ces nouveaux moteurs. Mais plus tard Colladon, en découvrant le moyen d'obtenir la compression isothermique des fluides, permit de résoudre la difficulté; ce moyen consiste simplement à injecter dans le compresseur de l'eau en pluie fine; la quantité d'eau à injecter est calculée avec un léger excès.

La Thermodynamique montre que les moteurs construits dans ces conditions sont susceptibles de fournir du travail mécanique avec un rendement bien supérieur à celui des machines à vapeur. Il y a dix-huit mois, M. J. Paraire (1) a publié en

(1) *L'Aéronaute*, mai 1891.

vue de la navigation aérienne un projet qui comporte trois cylindres, pour faciliter le passage aux points morts. D'après l'auteur, la consommation serait de 0,250 *kg* d'huile de pétrole ou de goudron par cheval-heure, et le poids du cheval-heure de 5 à 6 *kg* seulement; je dois ajouter que la machine n'a pas été construite et que, par suite, on n'a pu vérifier ces prévisions très optimistes. Plus récemment, M. Vermand (1), Ingénieur des constructions navales, a étudié un projet également en vue de la navigation aérienne; l'auteur indique aussi une consommation de 0,250 *kg* de pétrole, mais il ne donne pas le poids du cheval-heure.

Parmi les moteurs construits d'après les principes qui précèdent, je citerai celui d'un Ingénieur des mines, M. Genty, qui l'a exposé l'an dernier. Ce moteur, décrit en détail par le *Génie civil* (août 1892), est caractérisé par un récupérateur de la chaleur encore contenue dans l'air expulsé, et par son foyer qui se trouve dans le corps même du piston; la dépense du combustible, mélange de coke de four et de coke de pétrole provenant des résidus de raffineries, a été de 1,7 *kg* par cheval-heure, mais semble pouvoir être abaissée à 1 *kg*. Telle qu'elle est, du reste, cette machine, destinée à l'éclairage électrique des phares du cap d'Antifer, ne se prête ni par son poids, ni par son agencement, aux exigences de la navigation aérienne.

Moteurs à hydrocarbures. — Disons maintenant quelques mots des moteurs à hydrocarbures, répandus par milliers à l'étranger, mais peu employés en France, à cause du prix élevé du pétrole. Ici les hydrocarbures ne sont plus destinés à remplacer l'eau dans la chaudière, mais à se mêler intimement à l'air, à le *carburer*, de façon à lui donner des propriétés explosives.

Les moteurs à hydrocarbures ont sur les moteurs à gaz l'avantage, précieux dans le cas actuel, de transporter leur combustible sous une forme beaucoup plus compacte; c'est ce qui a permis de les appliquer aux bateaux, aux locomobiles, etc... De plus, comme les moteurs aérothermiques, ils sont d'une utilisation vraiment remarquable. Enfin leur vitesse moyenne est précisément celle qu'on tend à donner aux hélices aériennes, soit 200 tours environ par minute; on peut donc supprimer entre le moteur et l'hélice les engrenages qui absorbent une notable quantité de la puissance quand la vitesse du moteur est trop considérable.

La carburation à l'aide des pétroles, mélange d'hydrocarbures

(1) *L'Aéronaute*, octobre 1892.

de la série C^nH^{2n+2}, nécessite des dispositifs spéciaux. Si l'on se contentait en effet de faire passer plus ou moins longtemps l'air sur le pétrole, celui-ci deviendrait rapidement impropre à la carburation, par suite de la disparition rapide des hydrocarbures les plus volatils, et le moteur s'arrêterait après une marche irrégulière de quelques instants. Généralement on pulvérise le pétrole goutte à goutte et l'on volatilise cette poussière suivant les besoins du moteur, de façon à éviter l'irrégularité de marche et les encrassements dus à une mauvaise combustion. Parfois aussi on injecte dans l'air le pétrole en pluie fine. La dépense n'atteint pas 1 volume de pétrole pour 10 000 volumes d'air, soit 1/2 litre par cheval-heure, même avec les moteurs de faible puissance.

Malgré ces qualités, les moteurs à hydrocarbures offrent de grands inconvénients comme sources de force d'un ballon dirigeable : ils ont une marche peu régulière, ils exigent une grande quantité d'eau pour rafraîchir les cylindres et nécessitent des assises robustes : les moins lourds pèsent encore 150 *kg* par cheval ; toutefois, MM. Escher, Wyss et Cie ont réduit ce poids à 100 *kg* en faisant la carcasse et le bâti en bronze d'aluminium.

On peut obtenir la régularité par l'étude du pulvérisateur et par l'emploi de quatre cylindres disposés de telle sorte qu'au moment où l'explosion se produit dans l'un d'eux, les trois qui restent soient chacun à une des autres phases du cycle (expulsion des gaz qui résultent de la déflagration, aspiration de l'air dans les corps de pompe, compression avant l'explosion). MM. Forest et Gallice construisent ainsi d'excellentes machines qui, de plus, peuvent facilement changer le sens de leur marche. D'autre part, on conçoit qu'en réglant la déflagration et les diverses phases du cycle, on puisse arriver à diminuer les chocs, et à construire des moteurs donnant la force à un poids avantageux. C'est, paraît-il, le résultat auquel serait arrivé le commandant Renard avec son nouveau moteur à gazoline, qui donne 45 à 50 *chx* sur l'arbre et pèse au plus 1 400 *kg*, y compris l'approvisionnement pour dix heures de marche ; ce moteur, qui conduira *le Général-Meusnier*, pèsera donc environ 30 *kg* par cheval, poids une fois et demie moindre que celui du moteur de *la France*, qui, cependant, n'emportait qu'une heure et demie d'approvisionnement.

Les gazolines ont sur les pétroles l'avantage de rendre la carburation extrêmement simple. Ce sont en effet des pétroles rectifiés, homogènes, très volatils, dont la tension de vapeur est tou-

jours supérieure à celle de l'eau et dont la densité varie de 0,650 à 0,700 : il suffit d'aspirer au travers de feutres imbibés de gazoline une fraction du volume d'air qui doit agir sur le piston, et d'introduire au cylindre le complément d'air nécessaire pour assurer la combustion vive du mélange carburé.

Moteurs aérothermiques et à hydrocarbures n'ont pas dit leur dernier mot ; ils recevront, sans aucun doute, des perfectionnements importants. Un de ceux dont on attend les plus grands avantages consiste dans l'emploi d'un régénérateur, c'est-à-dire, suivant l'expression de M. Haton de la Goupillière (1), d'un appareil « qui emmagasine momentanément, pour les restituer ultérieurement, aux instants et dans la proportion convenables, les calories dont il est chargé de dépouiller le gaz, alors que le réfrigérant les engouffre définitivement et en pure perte durant la phase de compression isotherme ». Je dois ajouter que des savants comme Zeuner et Hirn mettent en doute l'utilité du régénérateur et que les tentatives faites jusqu'à présent, notamment celles de W. Siemens et de Hirsch, ne sont pas concluantes ; il est vrai que la construction du régénérateur offre des difficultés considérables, particulièrement en ce qui concerne le choix de la matière. Aussi conserve-t-il, malgré ses insuccès, de nombreux partisans : « Non seulement le régénérateur, disait récemment notre éminent collègue M. Gustave Richard (2), est un moyen d'augmenter le rendement des moteurs à gaz, mais il constitue en outre le seul moyen, peut-être pratique un jour, d'augmenter notablement ce rendement. »

Résumé. — Dans cette revue des moteurs, j'ai moins eu l'intention d'examiner successivement tous ceux qui peuvent intéresser la direction des ballons que de montrer quelles réductions on peut faire sur le poids des appareils actuels. Le moteur électrique semble condamné pour les voyages dépassant une demi-journée ; les générateurs à vapeur doivent changer et leur combustible et leur foyer et le liquide à vaporiser ; les machines aérothermiques, les moteurs à hydrocarbures se mettent sur les rangs, et ces derniers, si l'on en croit les échos de Meudon, auraient en ce moment l'avance. Mais que de progrès il reste à faire pour obtenir le moteur rêvé qui permettra de supprimer le ballon et de parcourir les airs avec des vitesses très supérieures à celles des oiseaux !

Avant d'en finir avec cette question, je dois faire remarquer

(1) Cours de Machines, d'Haton de la Goupillière.

(2) Les moteurs à pétrole depuis 1889, conférence de M. G. Richard à la Société d'Encouragement (24 juin 1892).

que les dynamos, désavantageuses comme poids, ont cependant sur les autres moteurs l'avantage de ne pas délester constamment le ballon. Peut-être y a-t-il moyen avec les machines à explosion de réaliser la stabilité verticale automatique en mêlant à l'air hydrocarburé un poids d'hydrogène égal au poids dont le ballon se déleste, au lieu de laisser ce gaz se perdre dans l'atmosphère. On utiliserait ainsi son grand pouvoir calorifique, on réduirait l'approvisionnement en hydrocarbure, enfin on diminuerait la résistance à l'avancement en obtenant l'équilibre dans une zone horizontale. Je souhaiterais que le nouveau moteur de Chalais-Meudon nous réservât la surprise d'un ingénieux dispositif qui permît la réalisation de tous ces perfectionnements.

Messieurs, j'ai terminé. Pour examiner dans le cours d'une séance une question d'un aussi grand développement, j'ai dû éliminer de parti pris tout ce qui ne s'y rapporte pas très directement; en particulier je n'ai pas voulu vous entretenir d'un sujet qui passionne beaucoup de chercheurs : la navigation aérienne par les appareils plus lourds que l'air.

En ce qui concerne les ballons, j'espère vous avoir démontré non seulement la possibilité de les diriger, mais encore la grande probabilité de pouvoir les employer bientôt dans de remarquables conditions de vitesse et de durée. Tout fait supposer, en effet, que notre siècle, dont une des plus grandes gloires est d'avoir réalisé la locomotion rapide sur la terre et sur l'eau, verra, avant de disparaître, la locomotion aérienne atteindre les vitesses de ses deux aînées. Assurément le ballon dirigeable ne fera jamais les vertigineux parcours que nous annoncent certains aviateurs se disant en mesure « de transporter en 5 ou 6 heures 200 000 hommes de Paris à Berlin » ! Mais combien d'années s'écoulera-t-il avant qu'un appareil volant réussisse à quitter le sol? Depuis longtemps les ballons dirigeables sillonneront l'espace.

Sachons donc nous contenter des résultats acquis; constatons avec un légitime orgueil qu'ils ont été poursuivis et obtenus dans le pays même des Montgolfier, et consolons-nous de ne pouvoir être témoins des tours de force dont je viens de vous parler en pensant que Robida lui-même, dont cependant l'imagination ne connaît pas d'obstacles, ne nous les a prédits que pour le siècle prochain.

TABLE DES MATIÈRES

PREMIÈRE PARTIE

Conditions du problème et tentatives de direction

DEUXIÈME PARTIE

Résistance à l'avancement et propulsion.

TROISIÈME PARTIE

Les moteurs légers.

IMPRIMERIE CHAIX, RUE BERGÈRE, 20, PARIS. — 8844-4-93. — (Encre Lorilleux).

